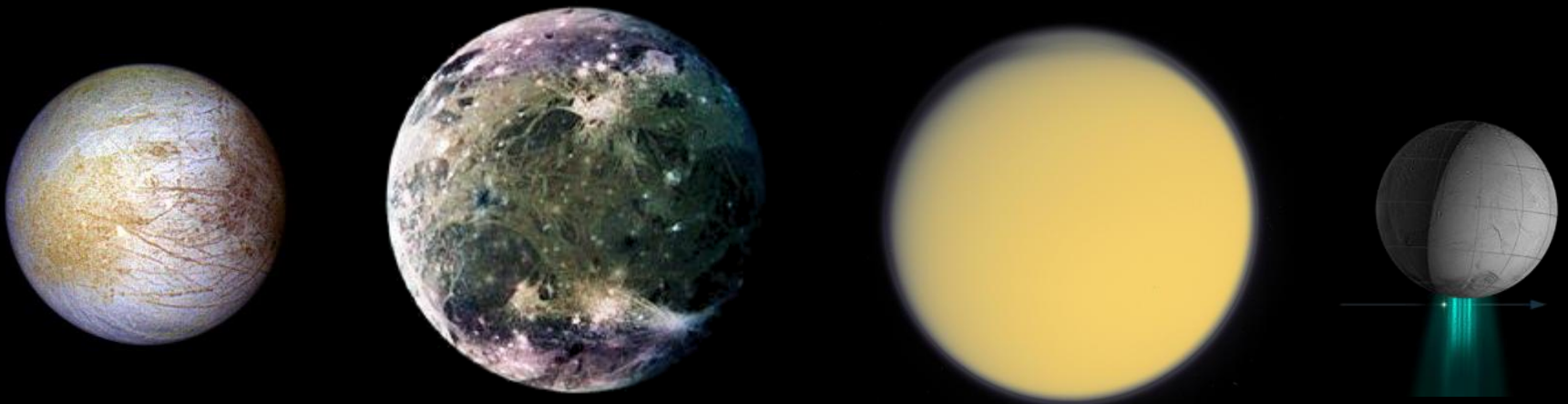


衛星系形成小研究会

2012年8月23日(水) マリンヒルホテル小樽

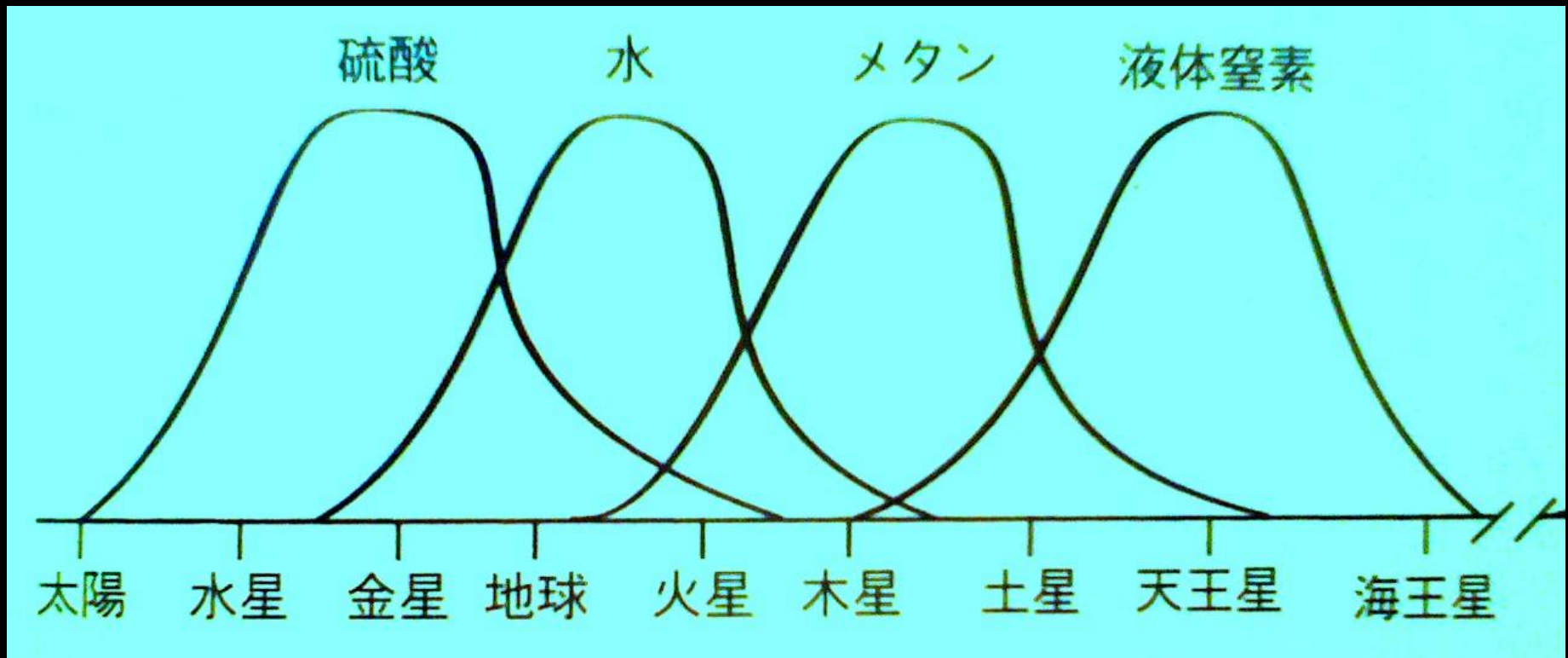
比較衛星バイオロジーを目指して



広島大学 生物圏科学研究科 長沼 タケシ(毅)

takn@hiroshima-u.ac.jp

太陽からの距離と液体

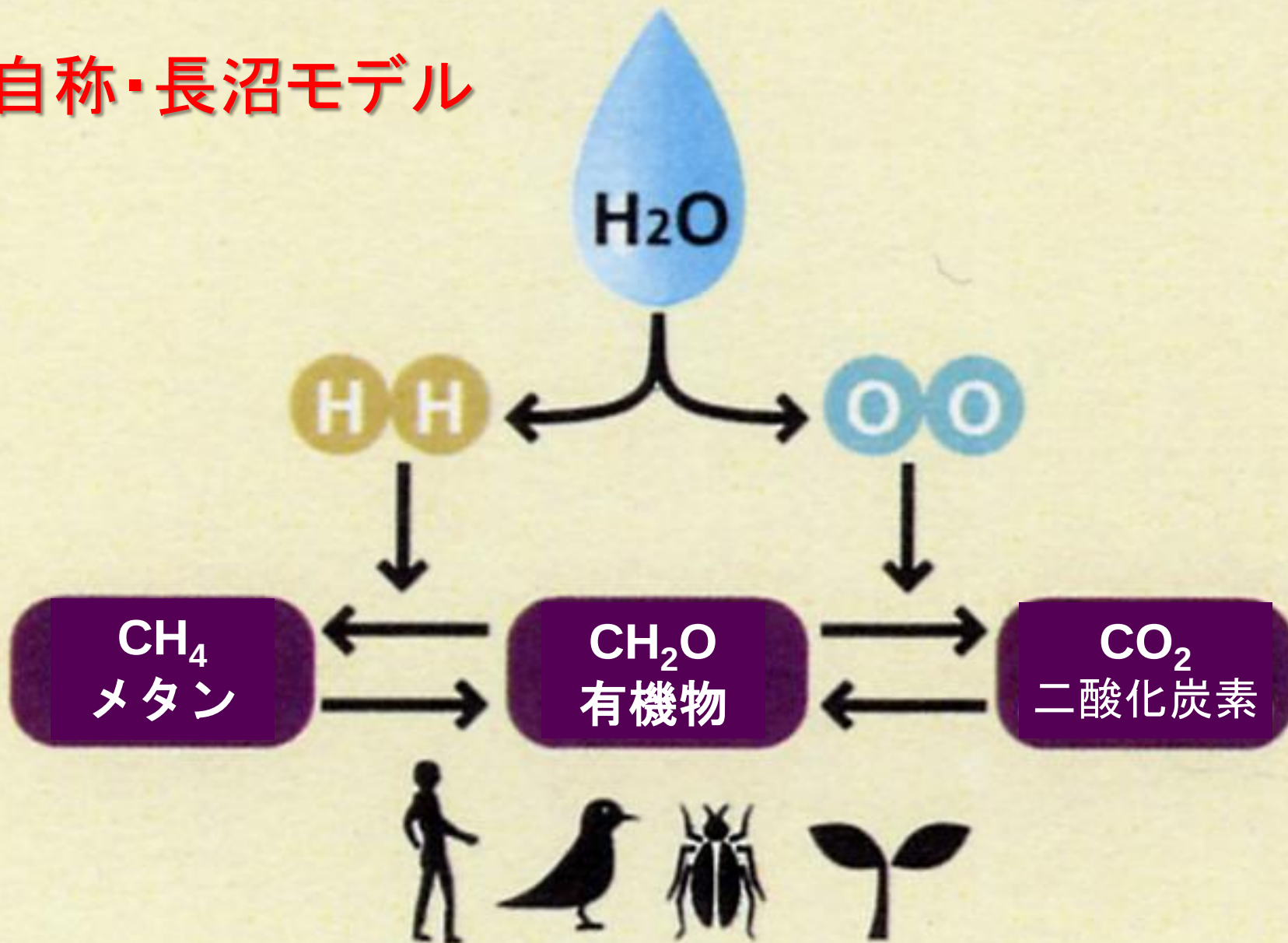


ピーター・D・ウォード著『生命と非生命のあいだ』p.114より

原典は Basin W (2001) The parts list of life.

Nature Biotechnology, **19**, 401-402.

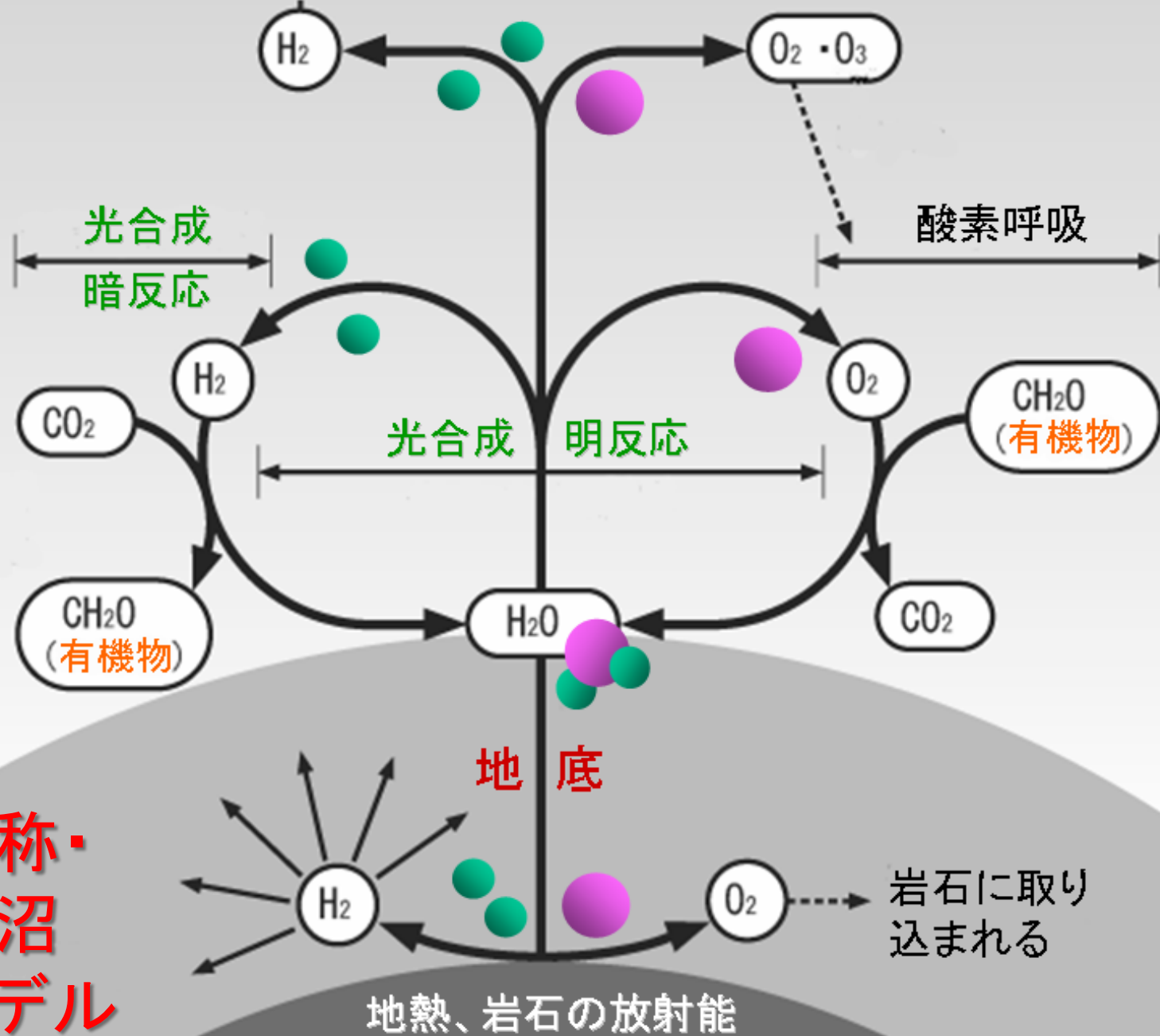
自称・長沼モデル



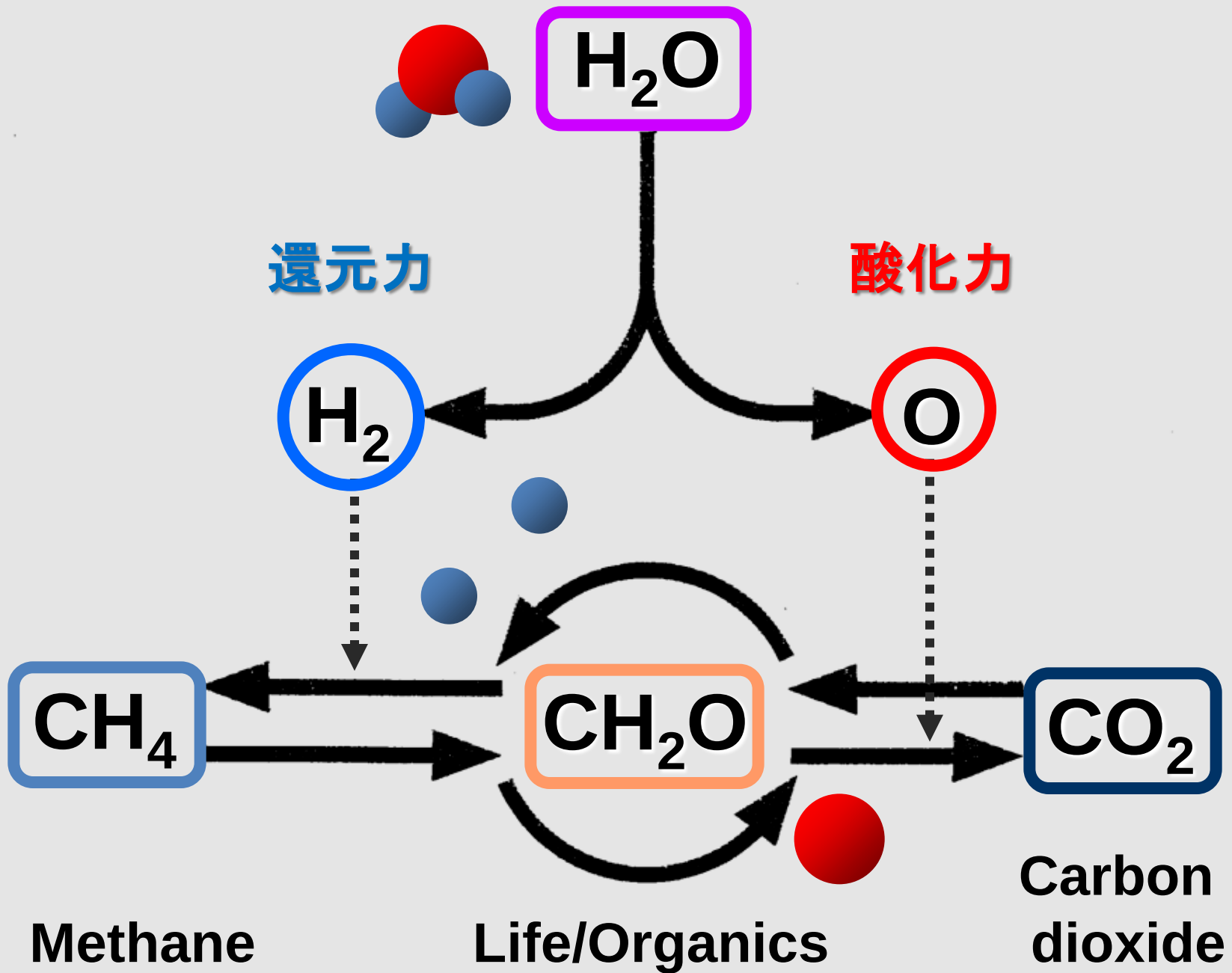
メタンと二酸化炭素の間をめぐる炭素

宇宙空間へ

大気上層部—光による水の分解



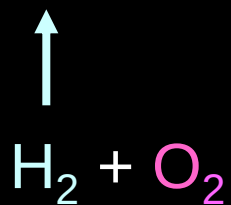
自称・
長沼
モデル



地球



宇宙空間へ



光分解
光合成

液体の H_2O

メタン



生命体
有機物



二酸化炭素



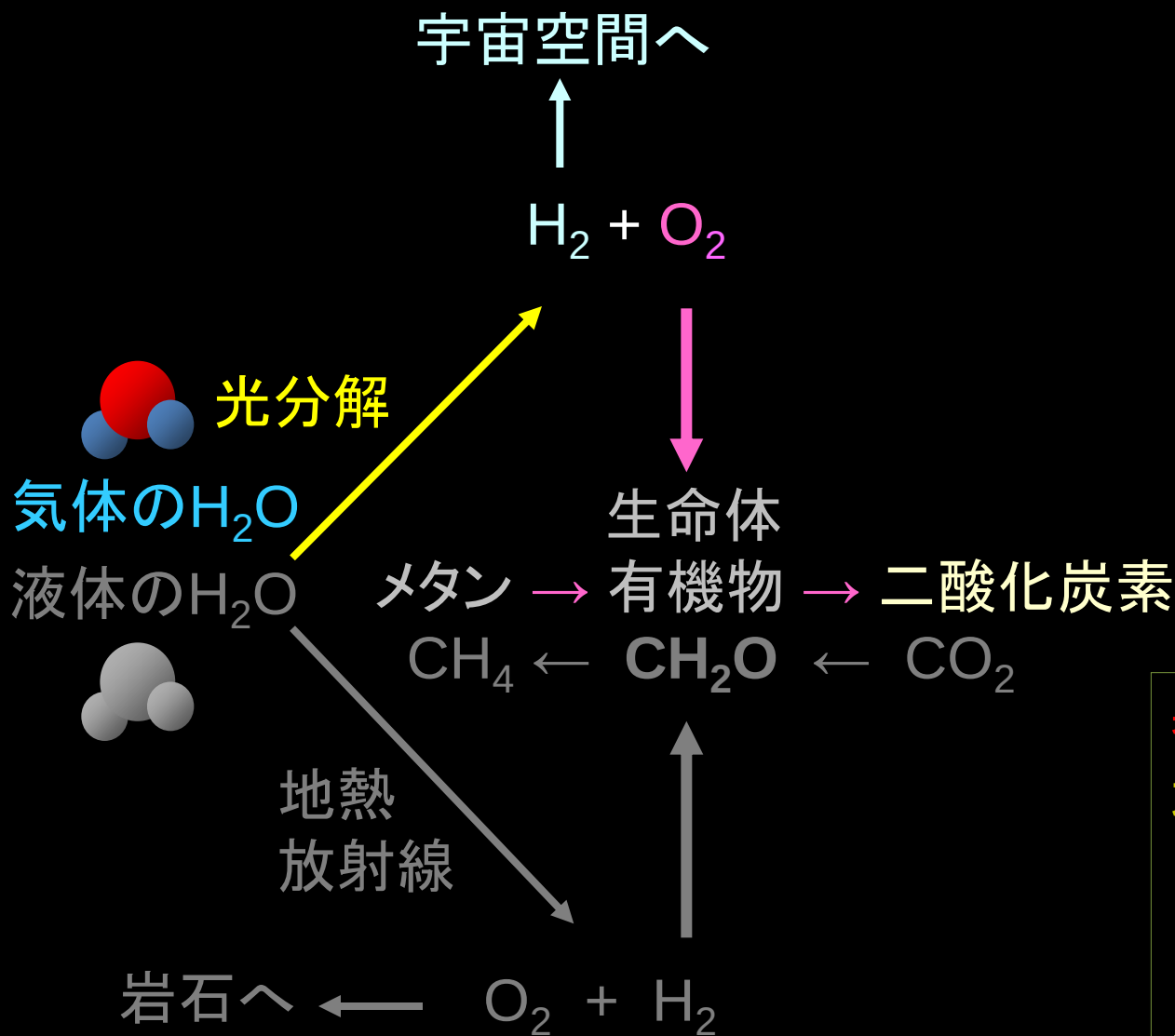
地熱
放射線

岩石へ



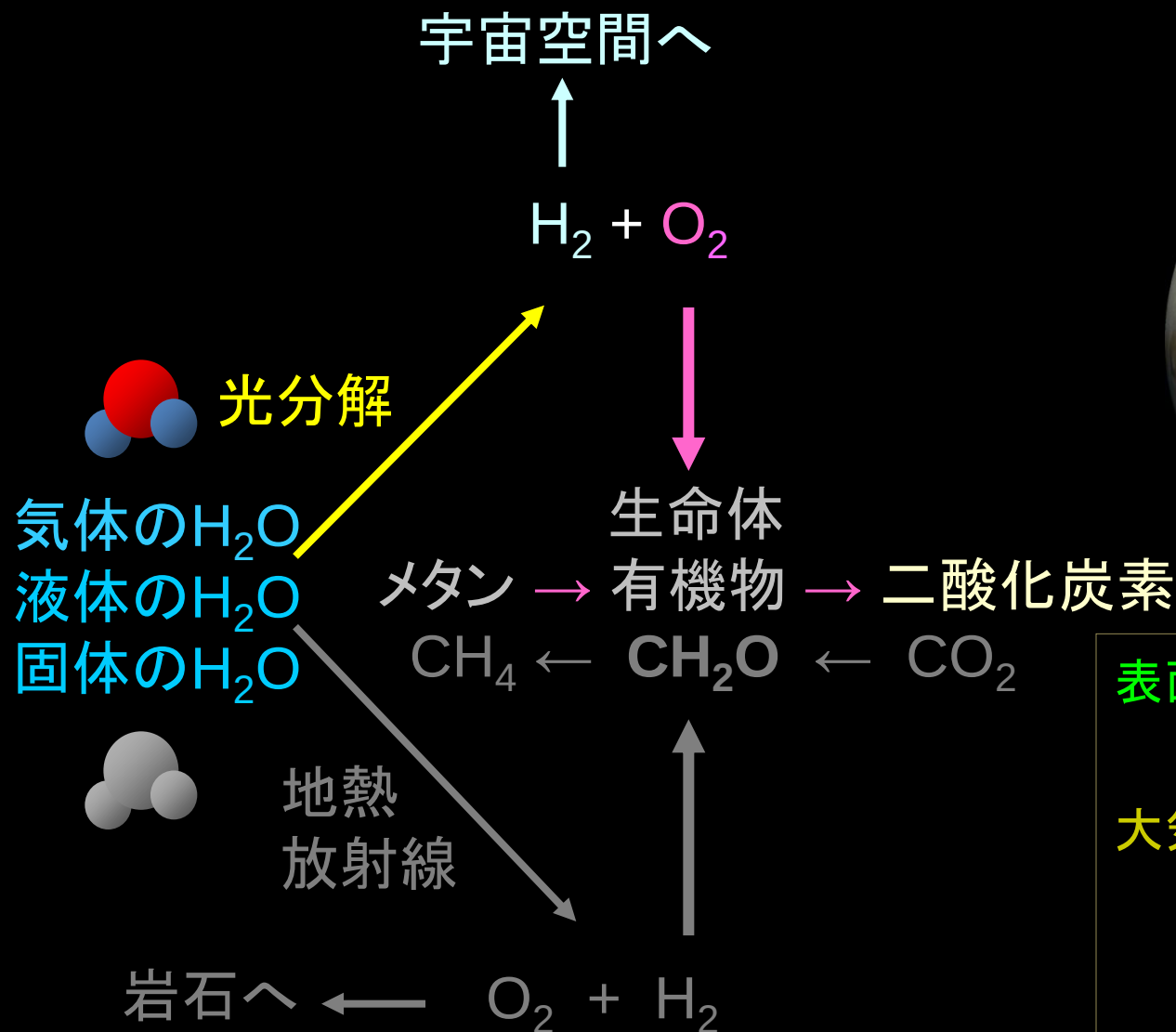
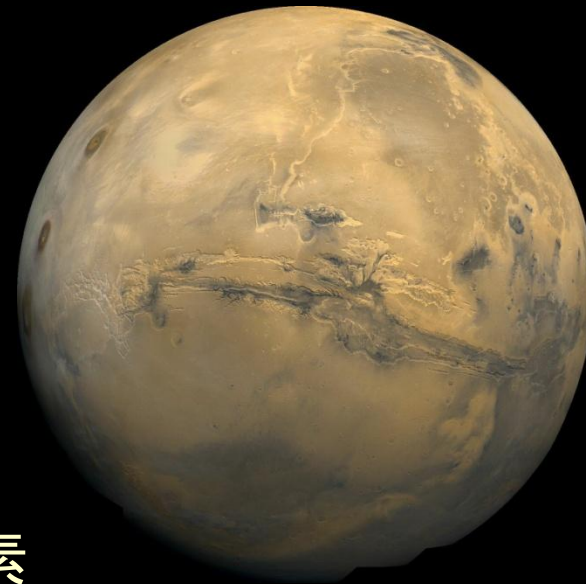
生命が	→ 無い	有る
表面温度	-18°C	$+15^\circ\text{C}$
大気		
CO_2	98%	0.03%
N_2	1.9%	79%
O_2	trace	21%

金星



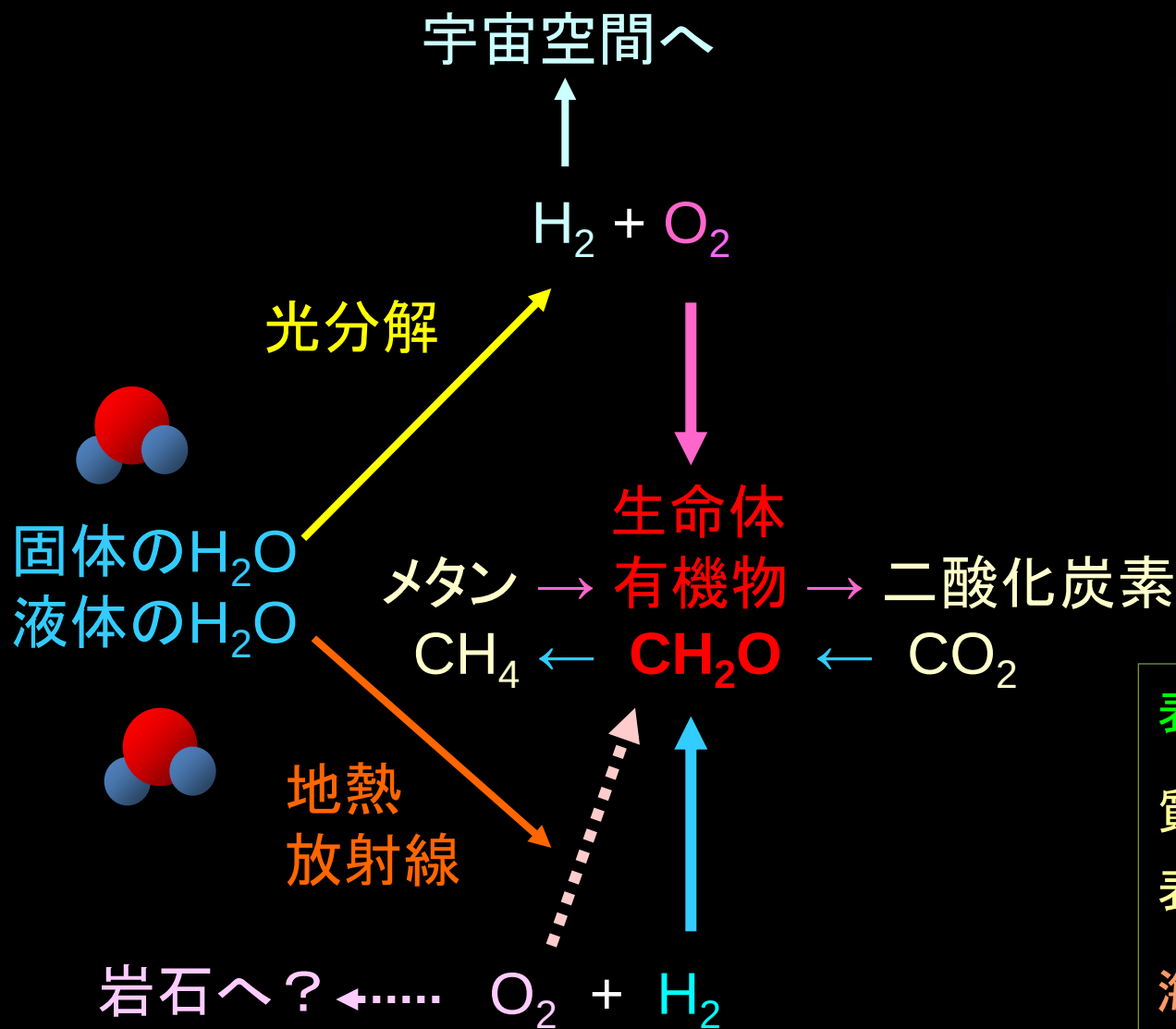
表面温度	480°C
大気組成	CO ₂ 98%
	N ₂ 1.9%
	O ₂ trace
質量	0.82 M _⊕
表面重力	0.91 G _⊕

火星



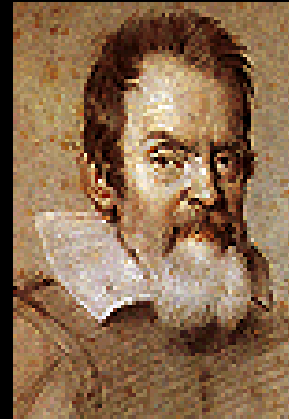
表面温度	-50°C ($-140 \sim +20^{\circ}\text{C}$)	
大気組成	CO_2	95%
	N_2	2.7%
	O_2	0.13%
質量	$0.11 M_{\oplus}$	
表面重力	$0.38 G_{\oplus}$	

エウロパ



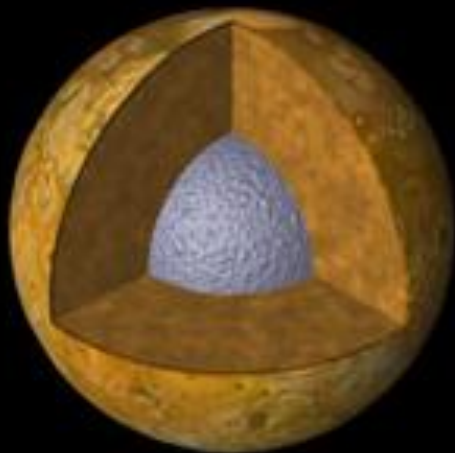
表面温度	-110°C
質量	$0.0008 M_{\oplus}$
表面重力	$0.13 G_{\oplus}$
海の深さ	50 km
水圧は地球の海の	
水深 6.5 km に相当	

ガリレオ衛星

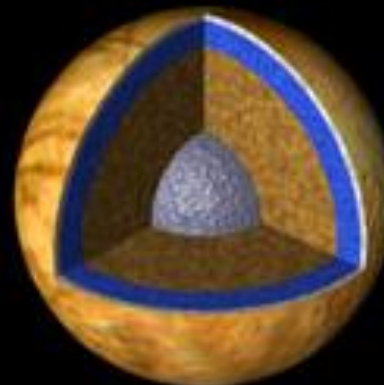


Galileo Galilei
15 Feb 1564
- 1642



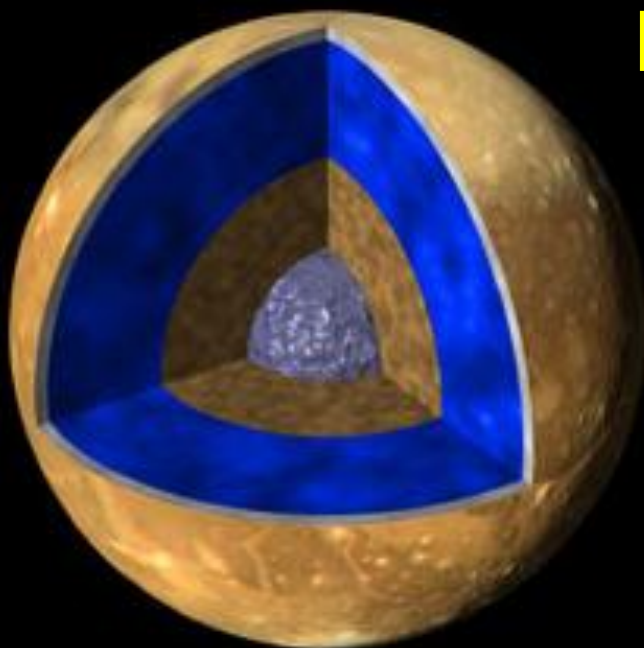


Io

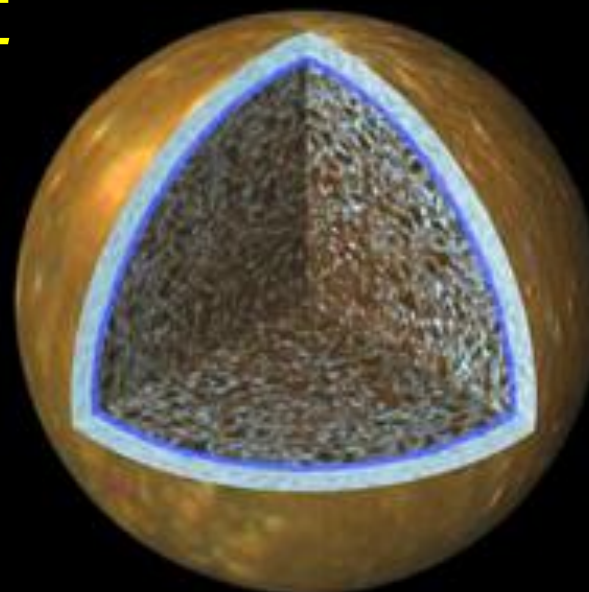


Europa

ガリレオ衛星の 内部構造

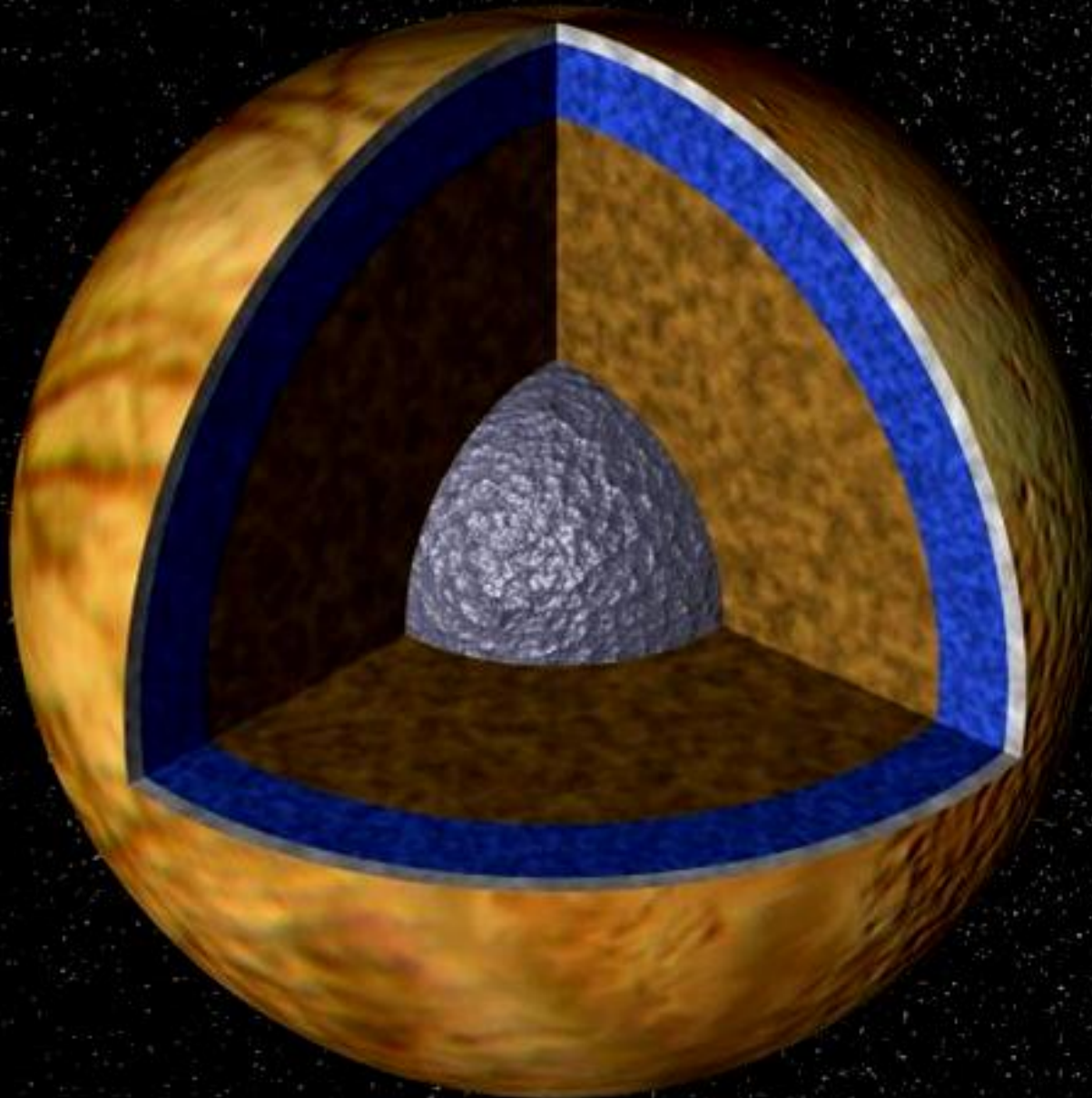


Ganymede

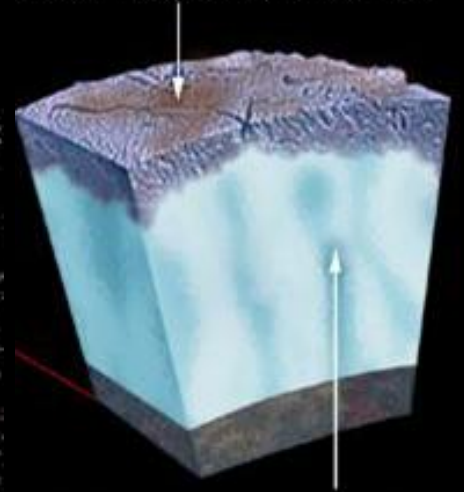


Callisto

エウロパの氷の下に必ずや 火山と海（内部海）が?!

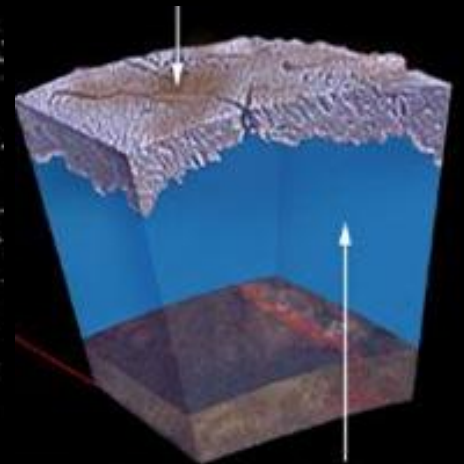


氷でおおわれた表面

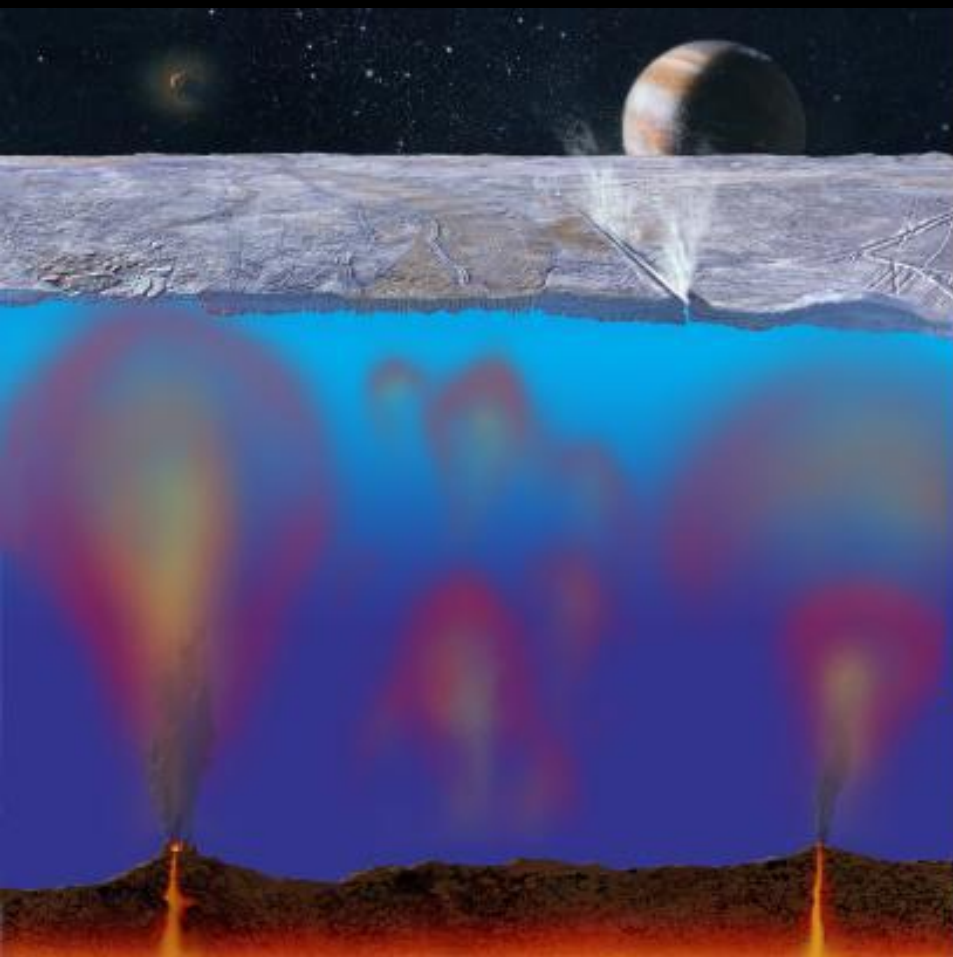


氷の底に火山がある

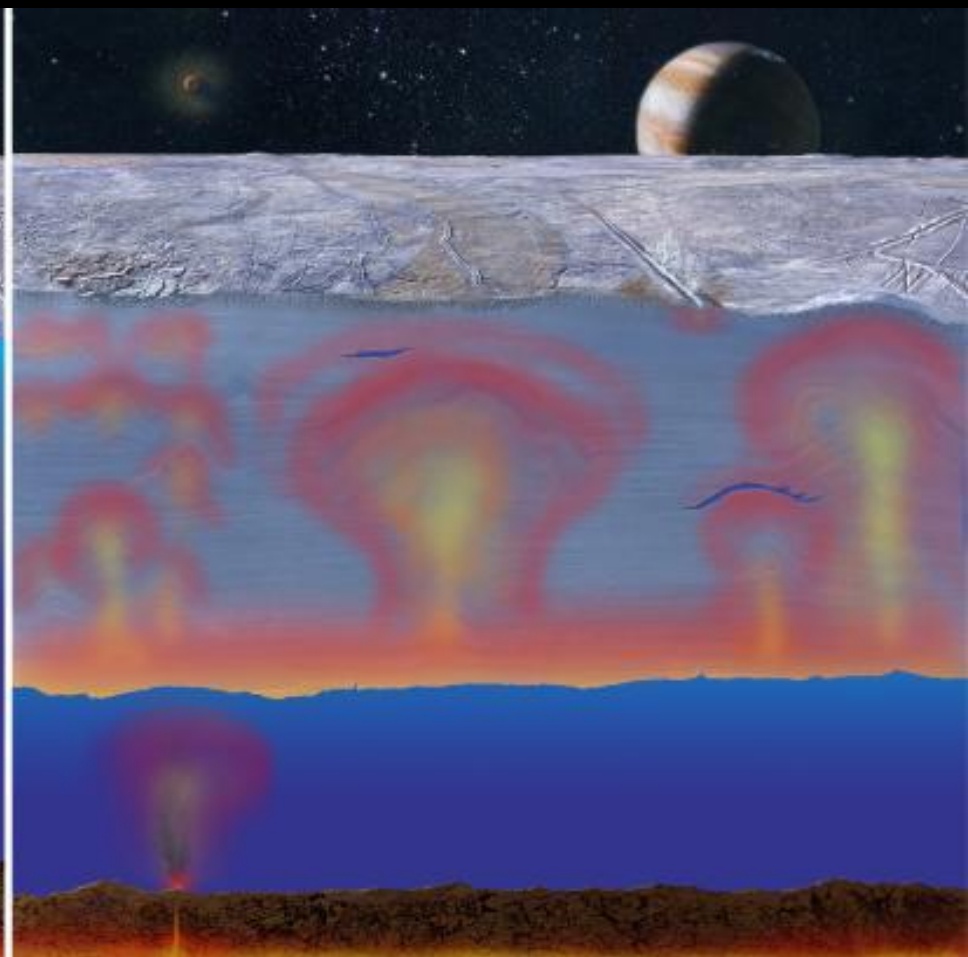
氷でおおわれた表面



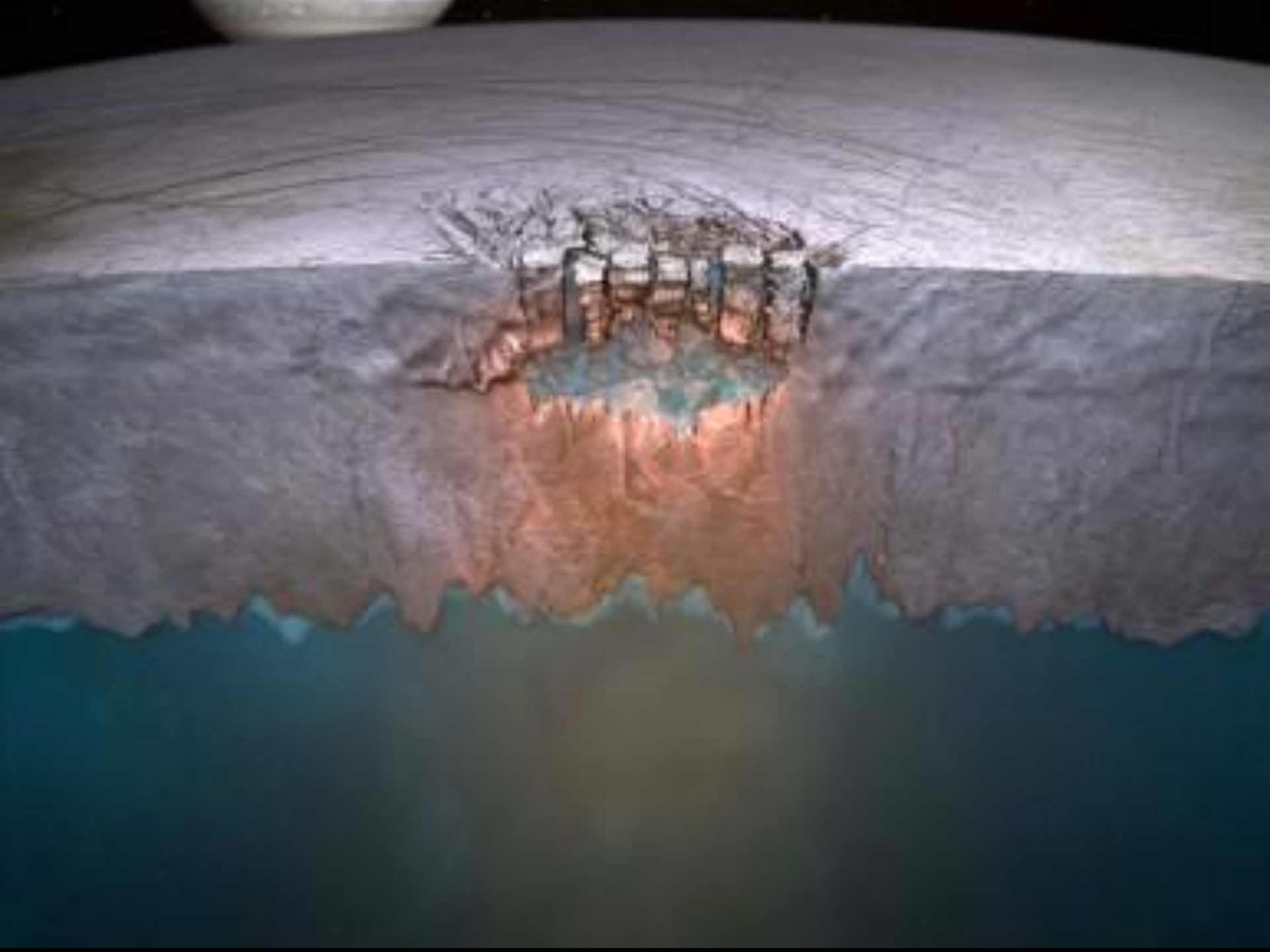
氷がとけた液体の水＝海



Thick Ocean

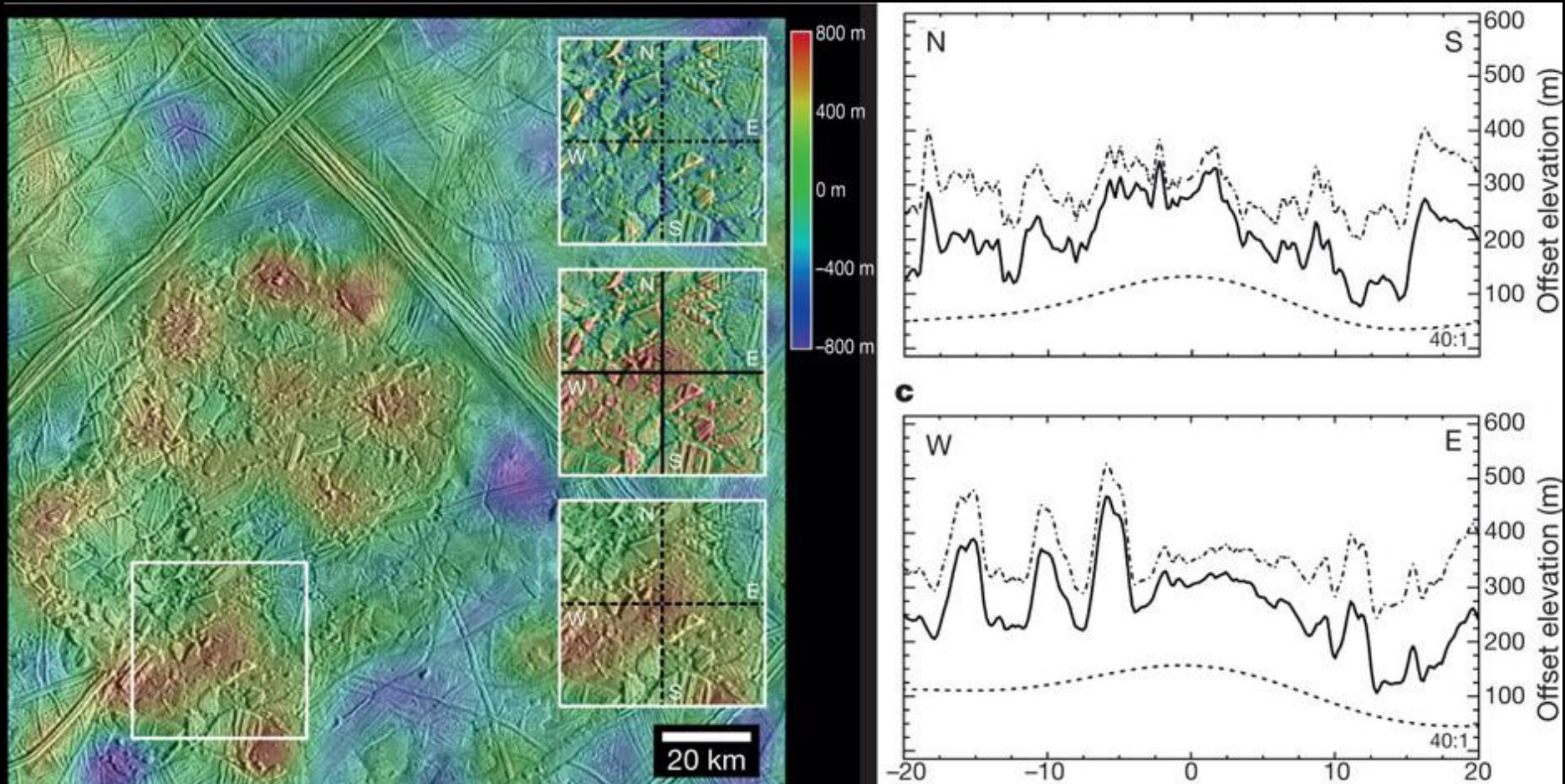


Thin Ocean

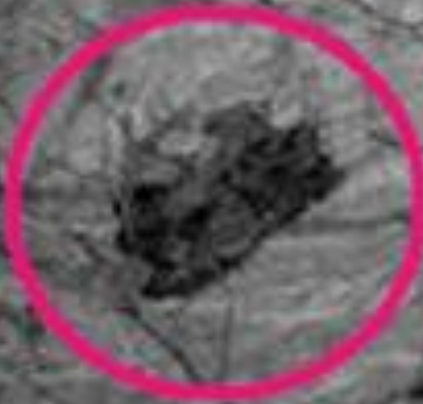
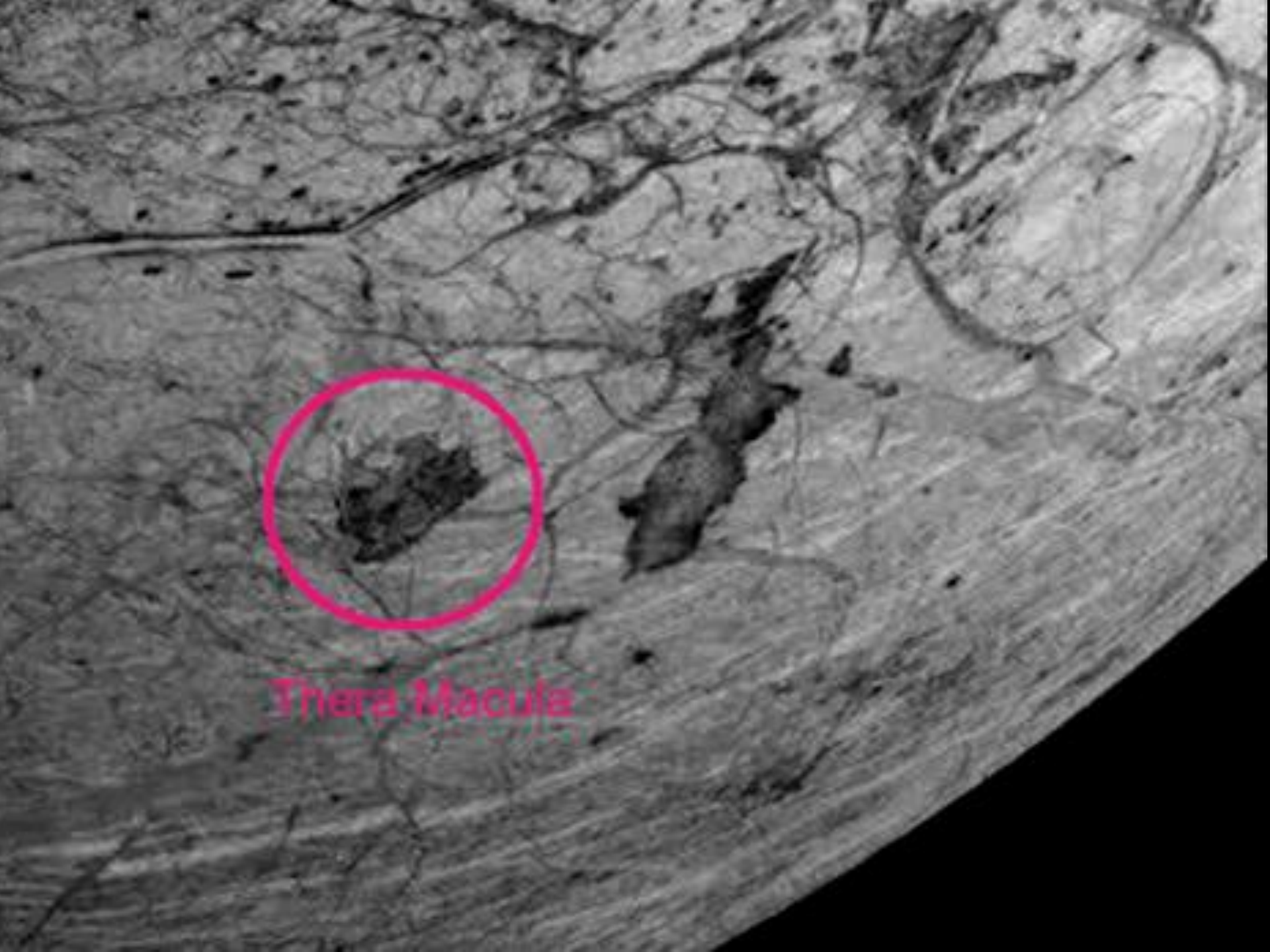


Active formation of 'chaos terrain' over shallow subsurface water on Europa

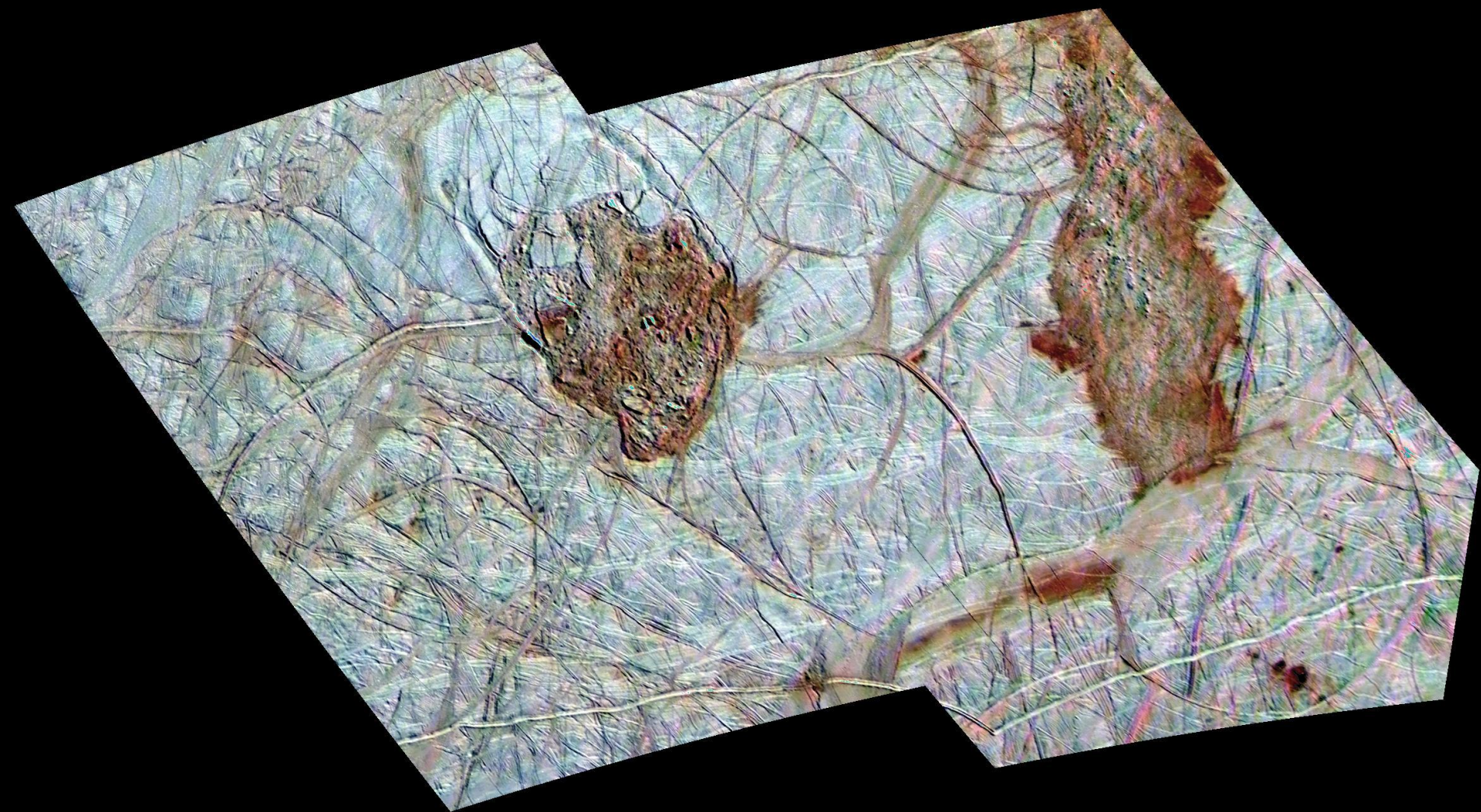
Conamara Chaos is dominated by long-wavelength topography

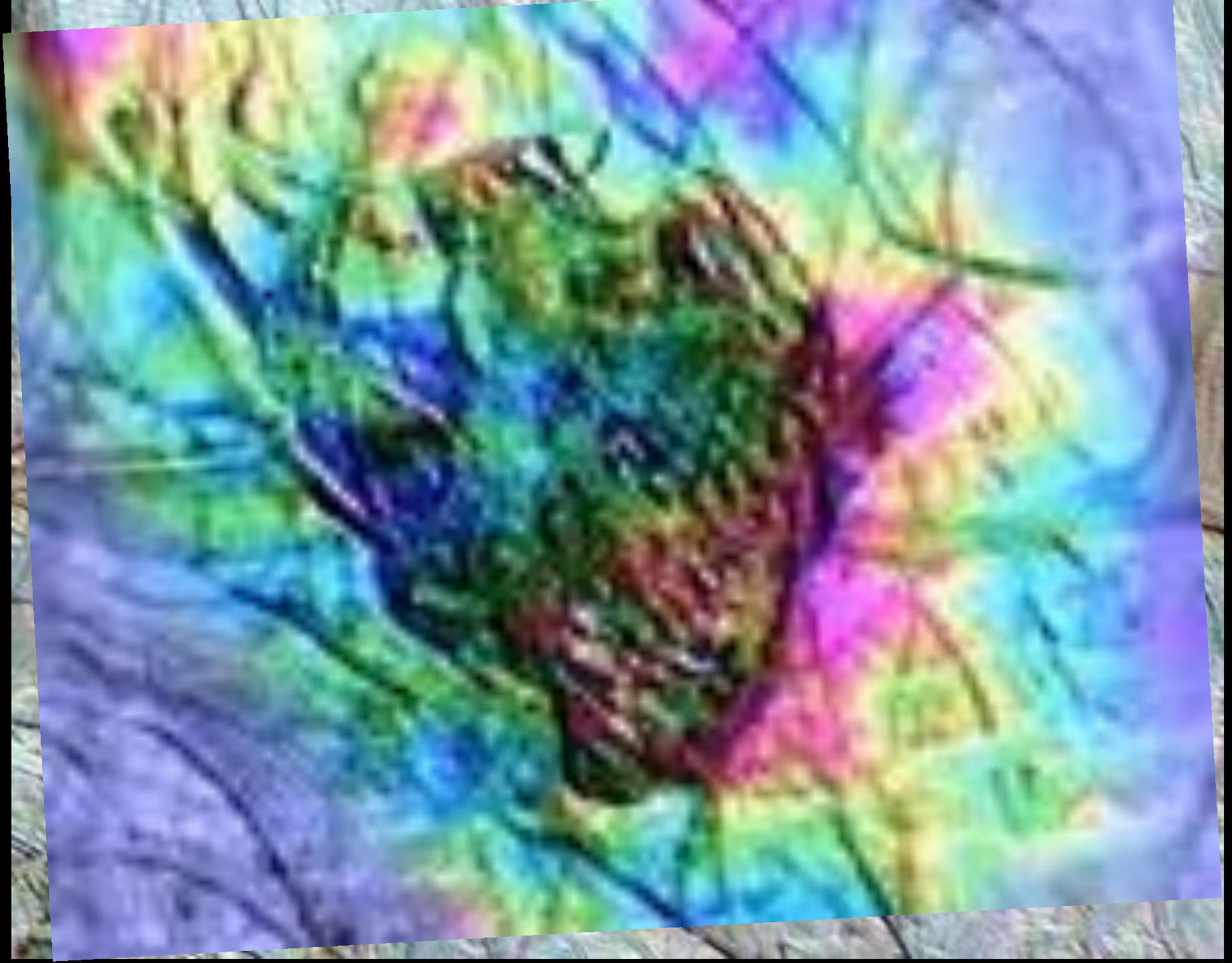


Schmidt *et al.* (2011) *Nature* 479, 502-505; Fig. 1



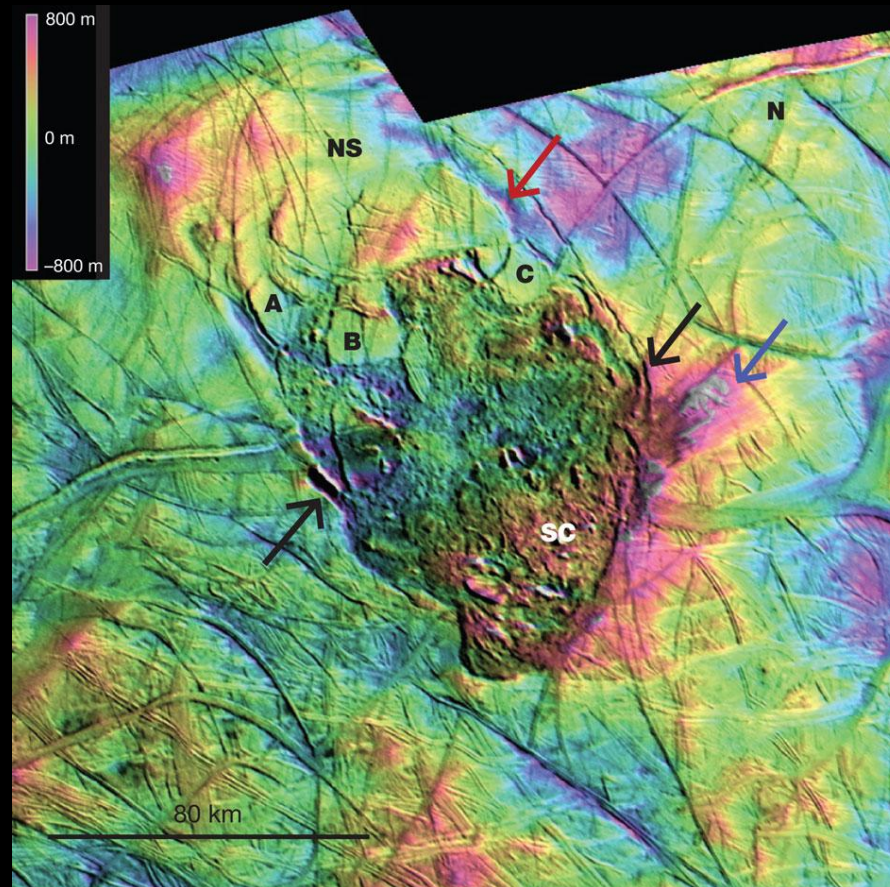
Thera Macula





Active formation of 'chaos terrain' over shallow subsurface water on Europa

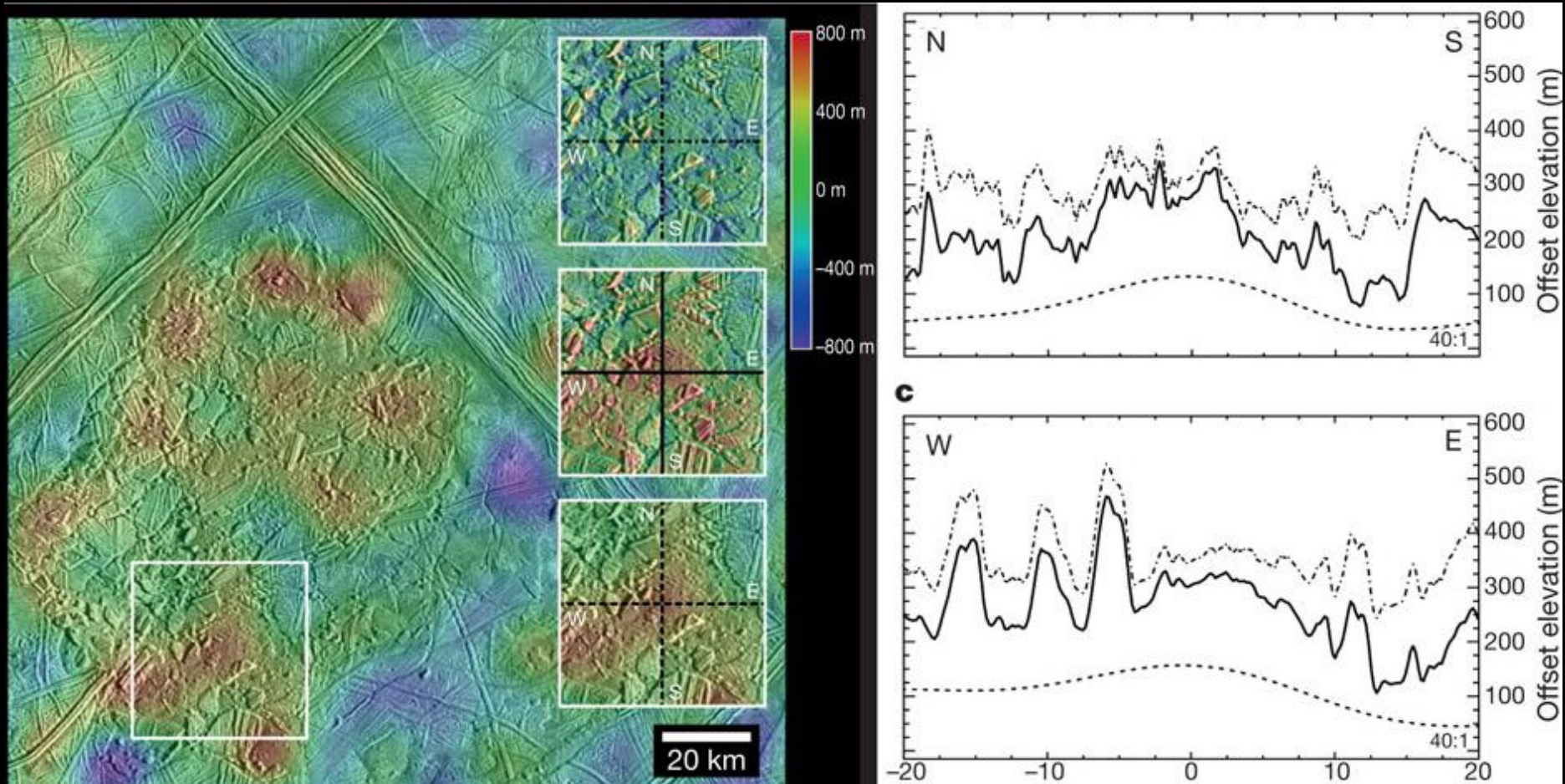
Thera Macula is a region of likely active chaos production above a large liquid water lens.



Schmidt *et al.* (2011) *Nature* 479, 502-505; Fig. 2

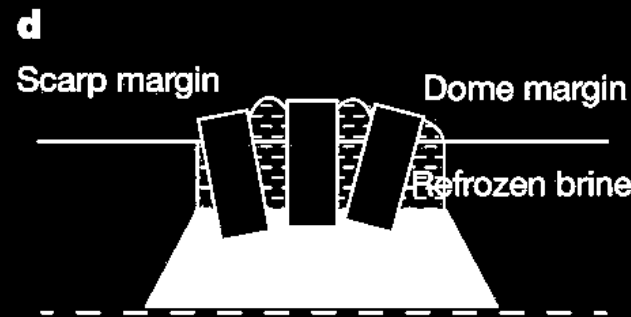
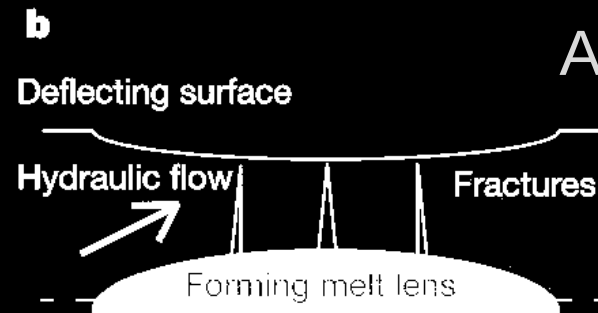
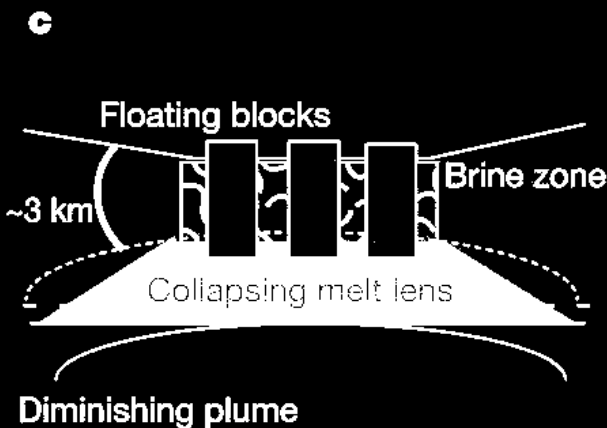
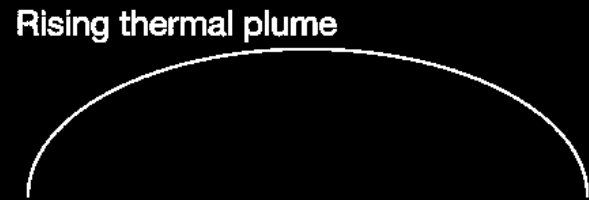
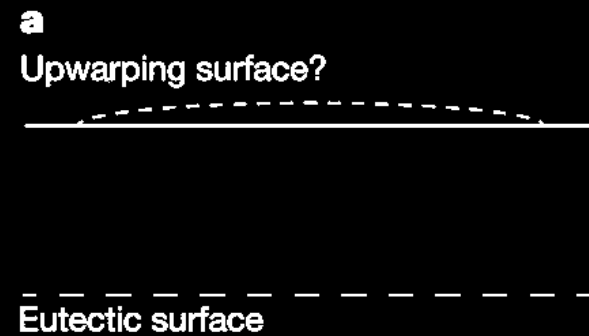
Active formation of 'chaos terrain' over shallow subsurface water on Europa

Conamara Chaos is dominated by long-wavelength topography



Schmidt *et al.* (2011) *Nature* 479, 502-505; Fig. 1

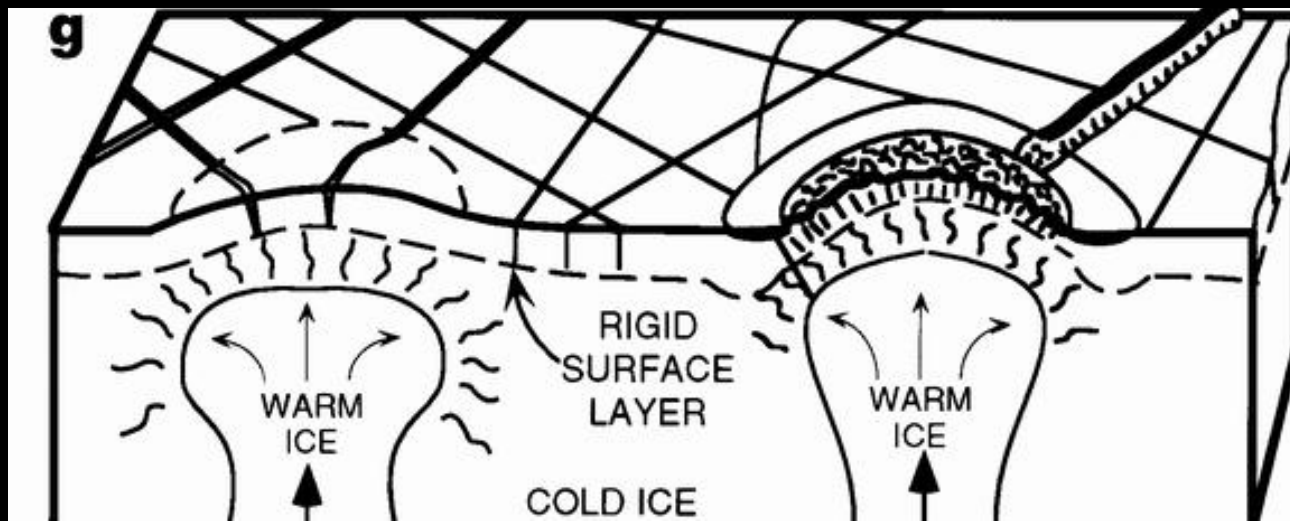
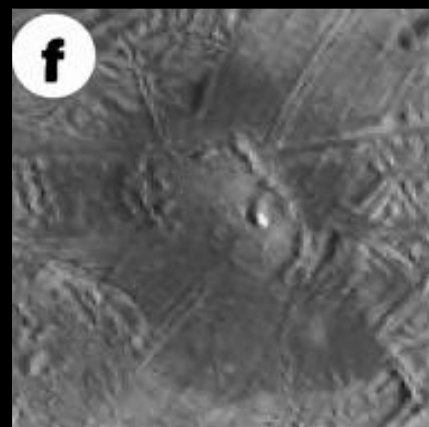
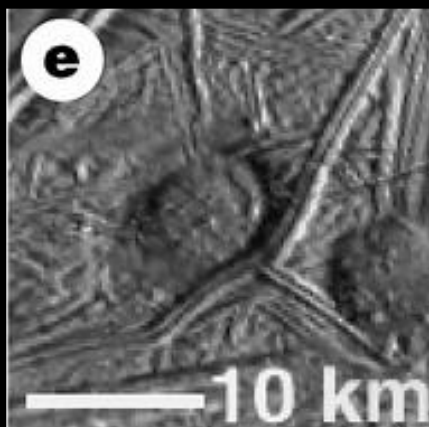
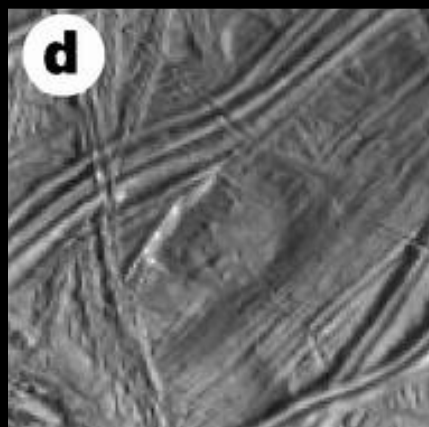
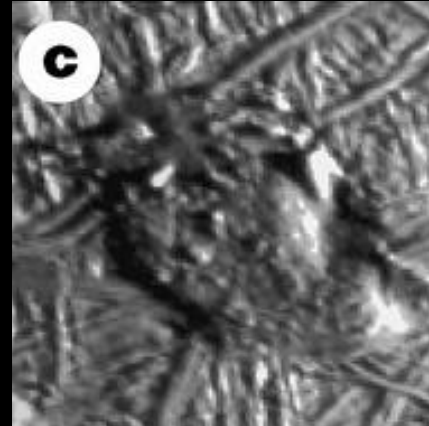
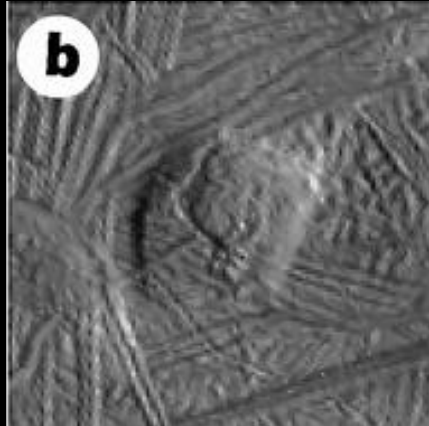
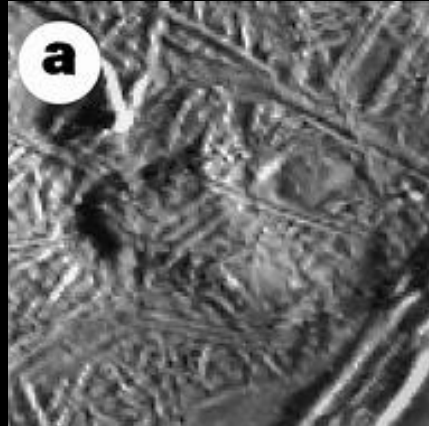
Active formation of 'chaos terrain' over shallow subsurface water on Europa



A new hypothesis for chaos formation



10 km



太陽紫外線

宇宙放射線

不純物の多い
共晶氷
(低融点)

プルーム
浮上による
盛り上がり

内部湖

内部湖

再凍結

温かい
純粋氷の
プルーム

(a)

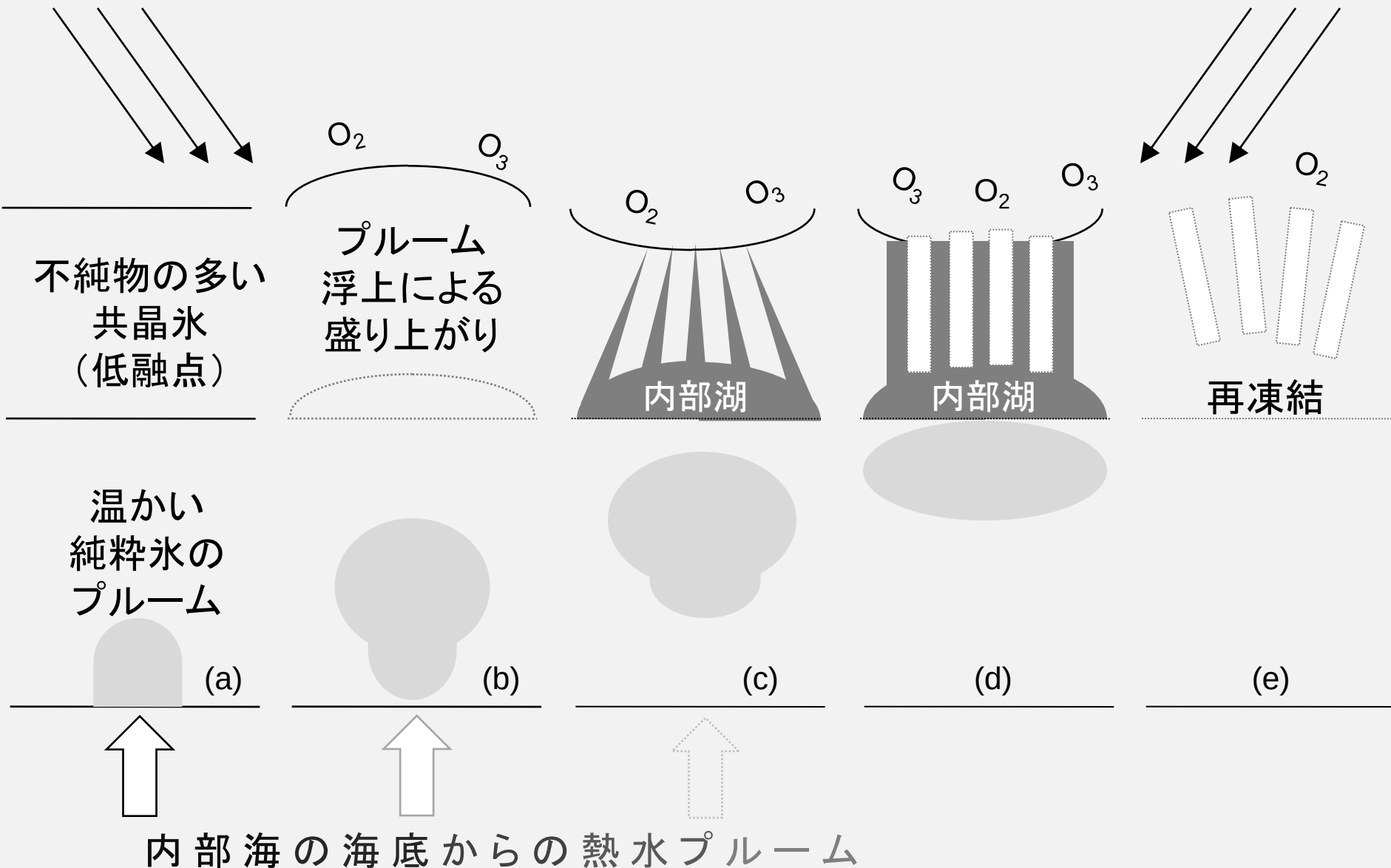
(b)

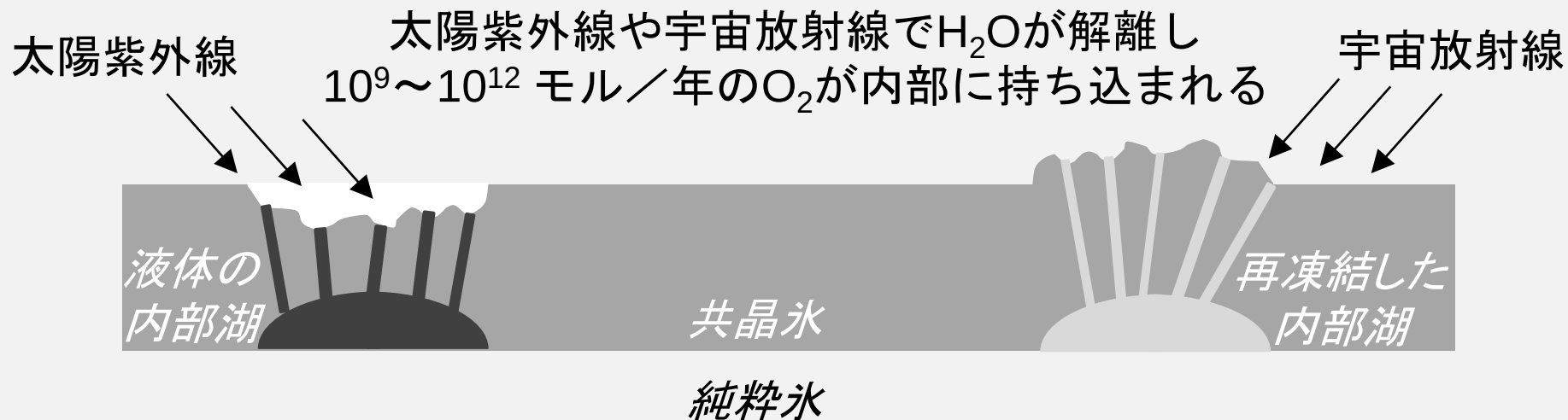
(c)

(d)

(e)

内部海の海底からの熱水プルーム





氷殻内の ^{40}K の放射性壊変で H_2O が解離し
 10^8 モル／年の O_2 がつくられる

内部海の ^{40}K の放射性壊変で H_2O が解離し
 10^{10} モル／年の O_2 がつくられる

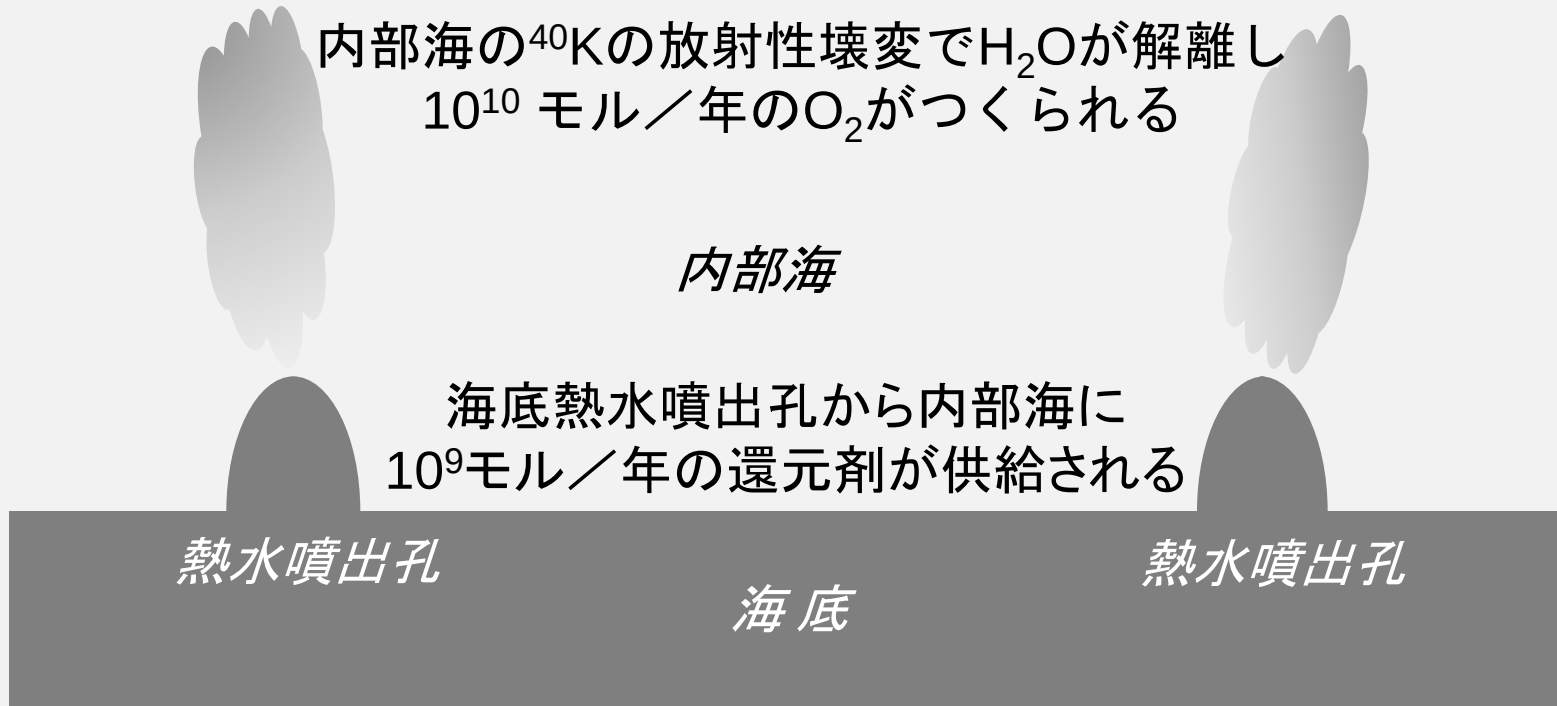
内部海

海底熱水噴出孔から内部海に
 10^9 モル／年の還元剤が供給される

熱水噴出孔

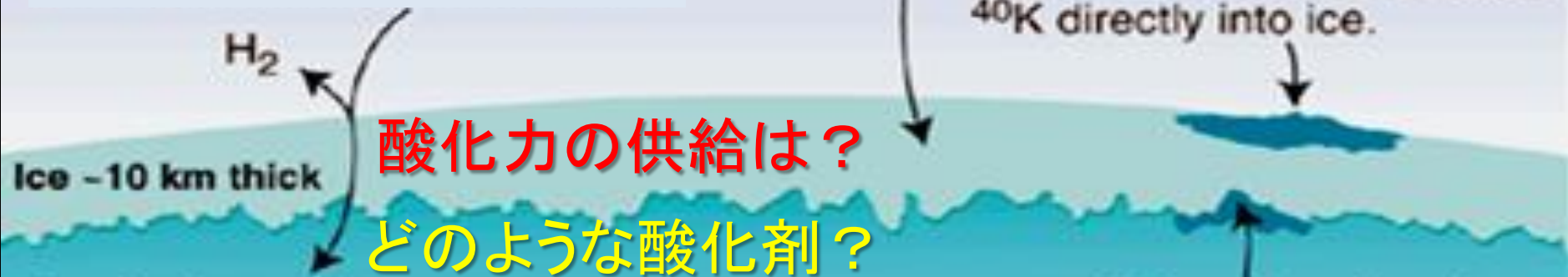
海底

熱水噴出孔



宇宙放射線による氷殻表面での
水の分解で O_2 と H_2 が生じる
(H_2 は宇宙空間へ)

氷殻の ^{40}K の放射性崩壊により
 10^8 モル／年の H_2 と O_2 がつくられる

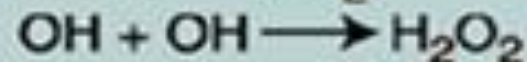
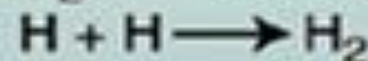
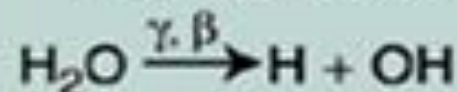


宇宙放射線による氷殻表面での
水の分解から $\sim 10^9$ ／年ないし
 10^{12} モル／年の O_2 が 内部海に
もたらされる

内部海の ^{40}K の
放射性崩壊により
 10^{10} モル／年の
 H_2 と O_2 がつくられる

Subsurface freezing
excludes the majority
of ^{40}K from ice.

Example reactions:



Liquid H_2O ocean ~100 km deep

H_2S, H_2, CH_4, Fe

Chyba & Hand
(2001)
Science, 292
2026-2027

大胆な試算として 10^9 モル／年の還元剤 が内部海に供給される

Charged particle radiolysis and photolysis of H_2O yields H_2O_2 and O_2 . H_2 escapes to space.

^{40}K decay in ice may yield $\sim 10^8 \text{ mol year}^{-1} \text{ O}_2 + \text{H}_2$.

Cryovolcanism incorporates ^{40}K directly into ice.

H_2

酸化力の供給は？
どのような酸化剤？

Ice $\sim 10 \text{ km}$ thick

Gardening and transport could deliver $\sim 10^9$ to $10^{12} \text{ mol year}^{-1} \text{ O}_2$.

Decay of oceanic ^{40}K may produce $\sim 10^{10} \text{ mol year}^{-1} \text{ O}_2 + \text{H}_2$.

Subsurface freezing excludes the majority of ^{40}K from ice.

Example reactions:

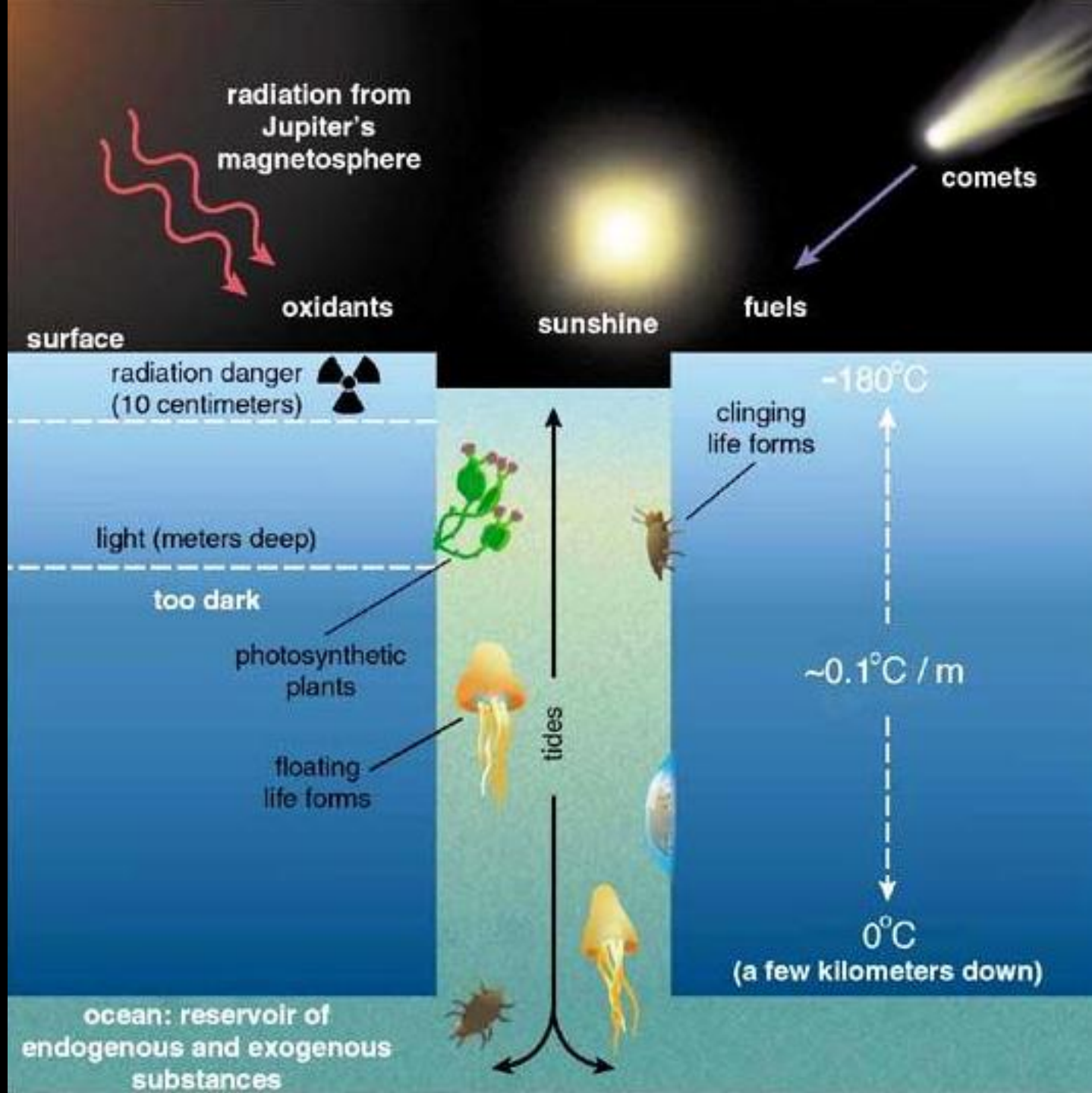


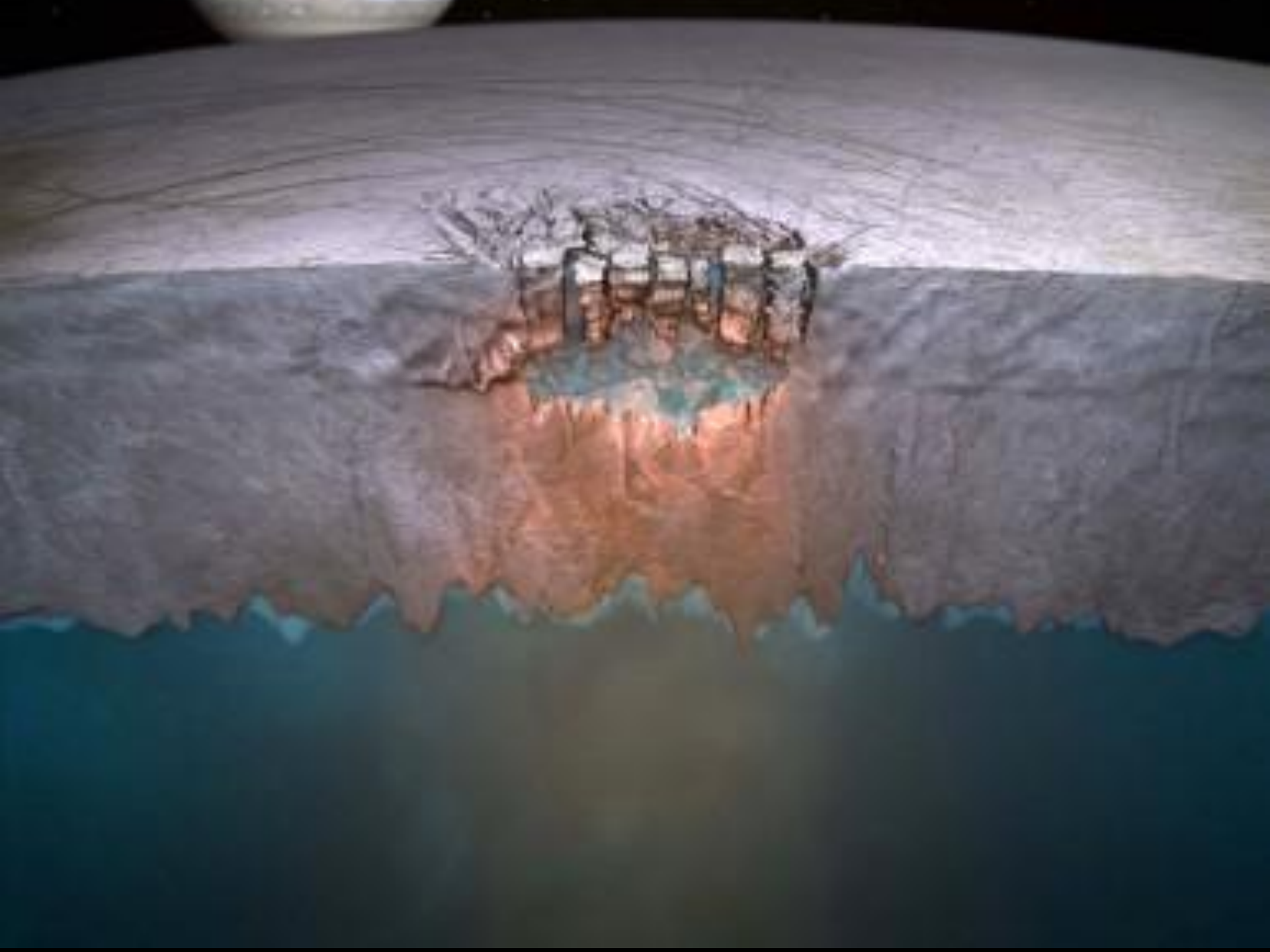
Liquid H_2O ocean $\sim 100 \text{ km}$ deep

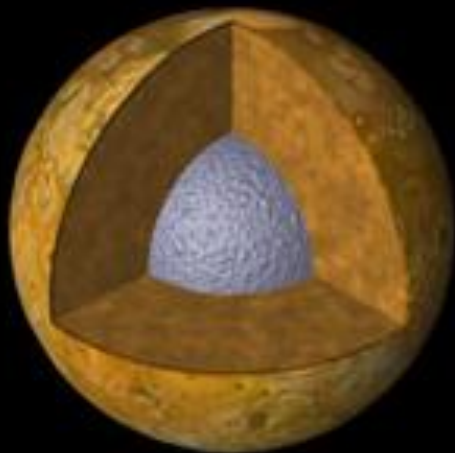
H_2S , H_2 , CH_4 , Fe

Chyba & Hand
(2001)
Science, **292**
2026-2027

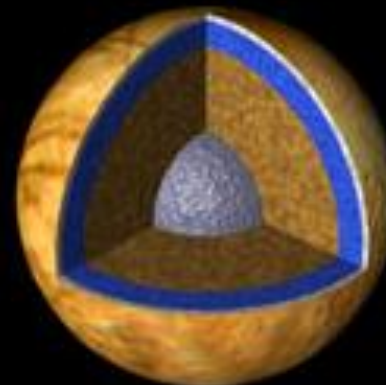
Uncertain estimates of $\sim 10^{10} \text{ year}^{-1}$ of hydrothermal fluid into the ocean would yield $\sim 10^9 \text{ mol year}^{-1}$ reductants





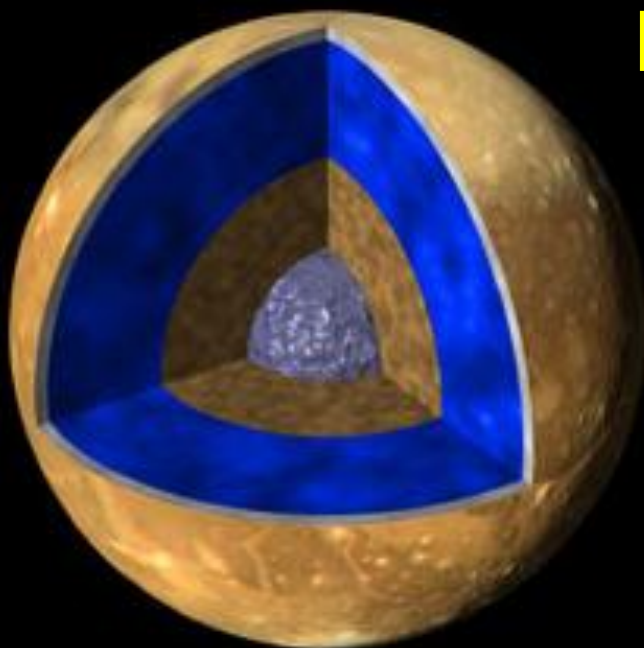


Io

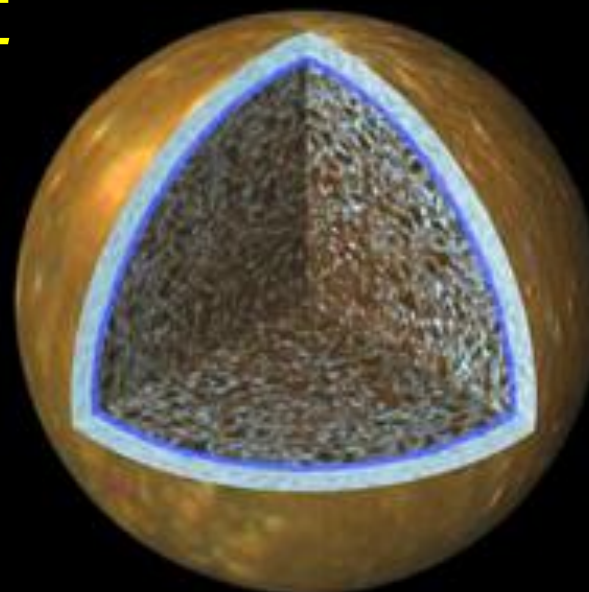


Europa

ガリレオ衛星の 内部構造

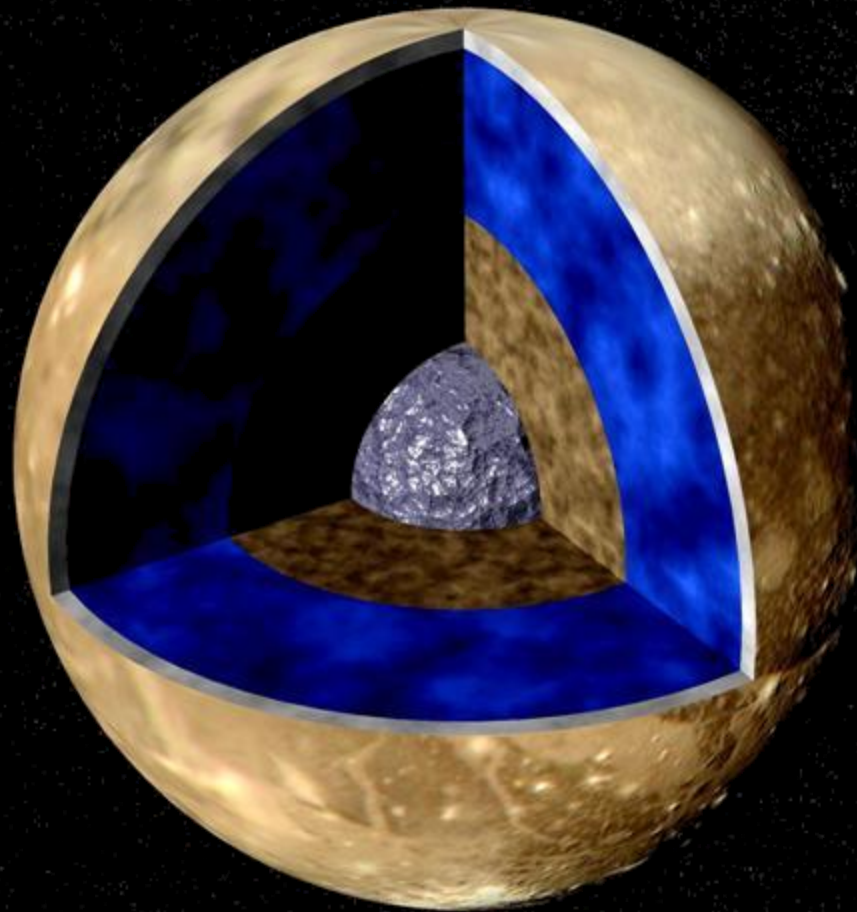


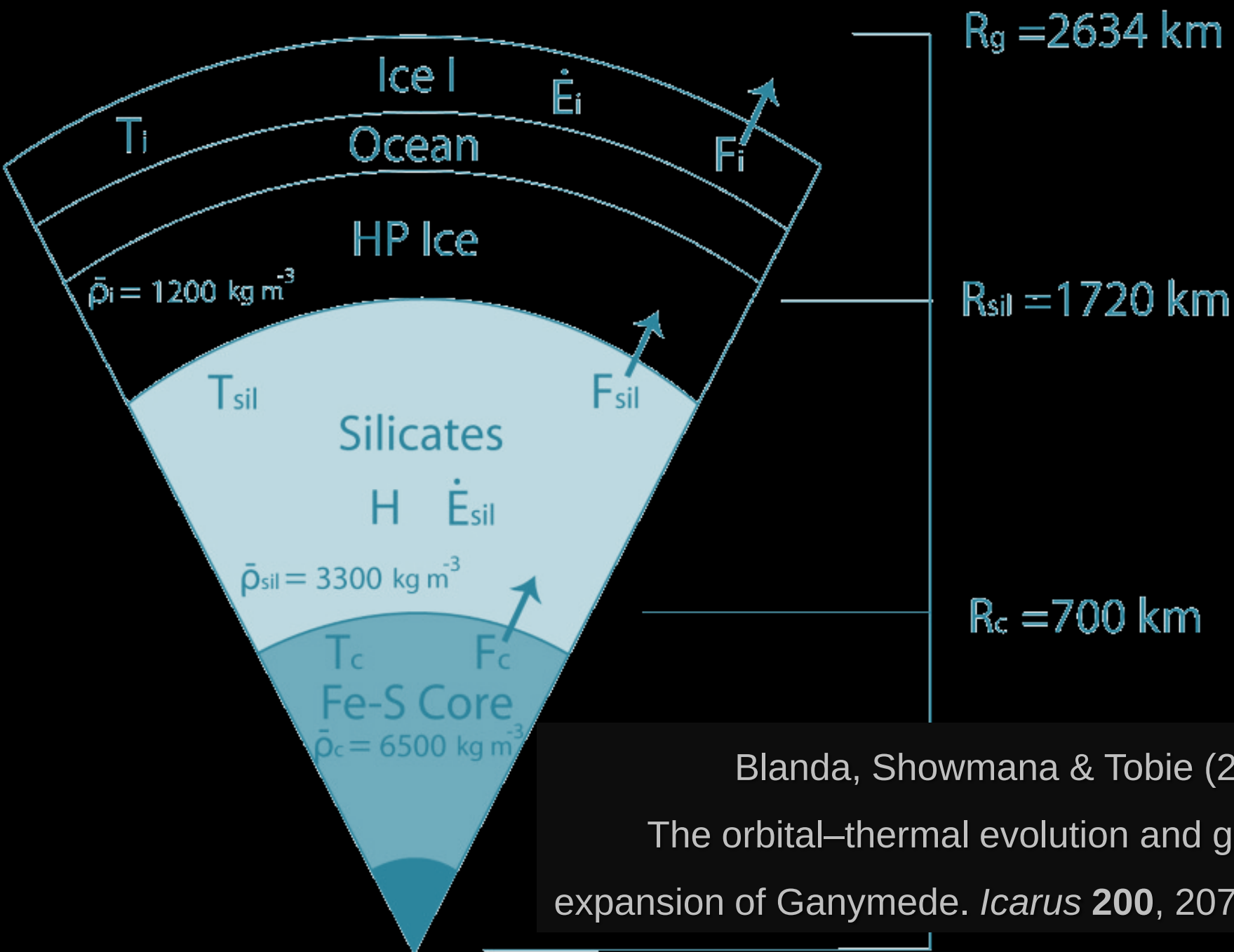
Ganymede



Callisto

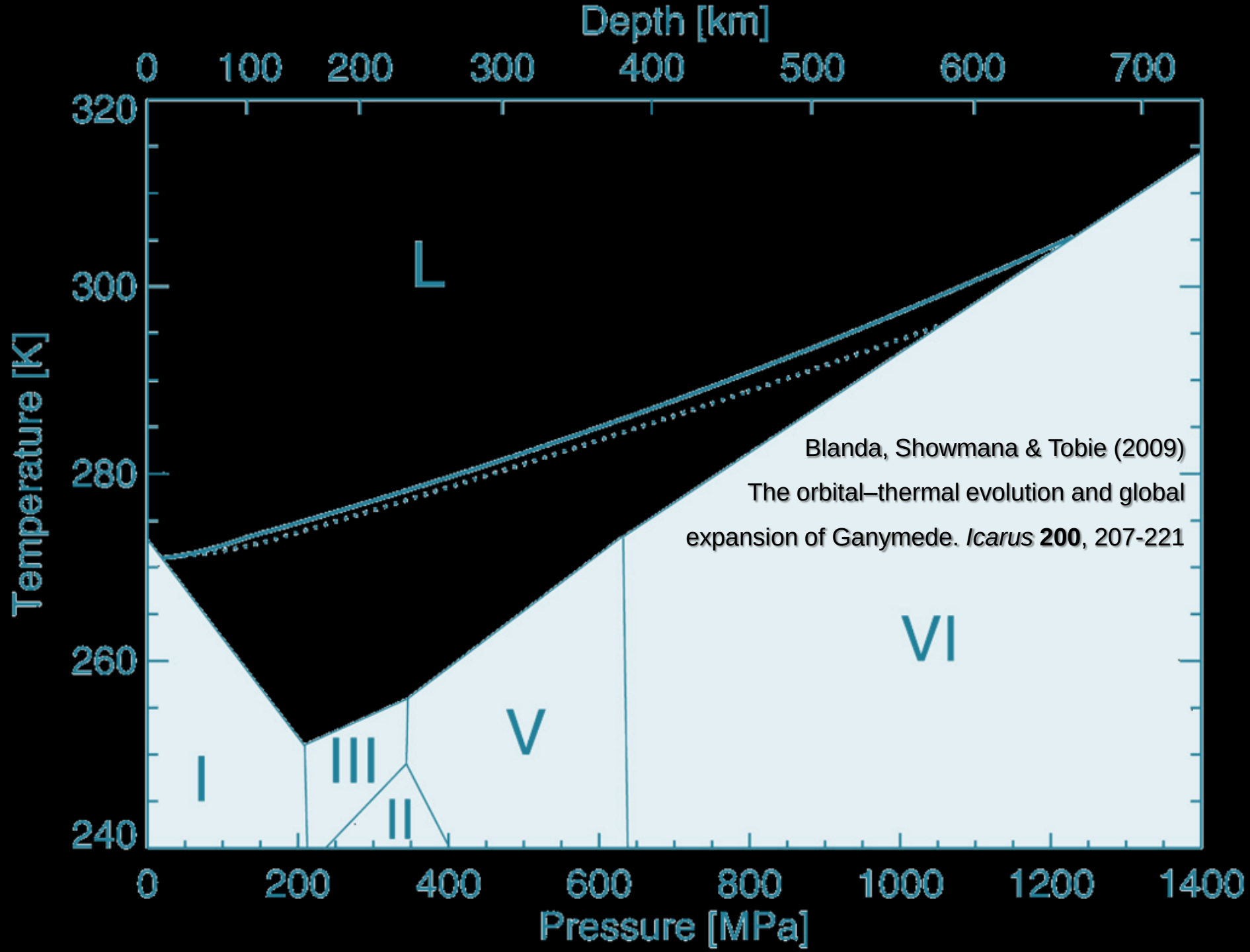
J III
ガニメデ
Ganymede





Blanda, Showmana & Tobie (2009)

The orbital–thermal evolution and global expansion of Ganymede. *Icarus* **200**, 207-221



Blanda, Showmana & Tobie (2009) The orbital–thermal evolution and global expansion of Ganymede. *Icarus* 200, 207-221

Nakamura, Ohtani & Kondo (2005) High pressure ices and sulfates in Ganymede's subsurface ocean. *Geophys Res Abst* 7, 03608.

Poirier, Sotin & Peyronneau (1981) Viscosity of high-pressure ice VI and evolution and dynamics of Ganymede. *Nature* **292**, 225–227.

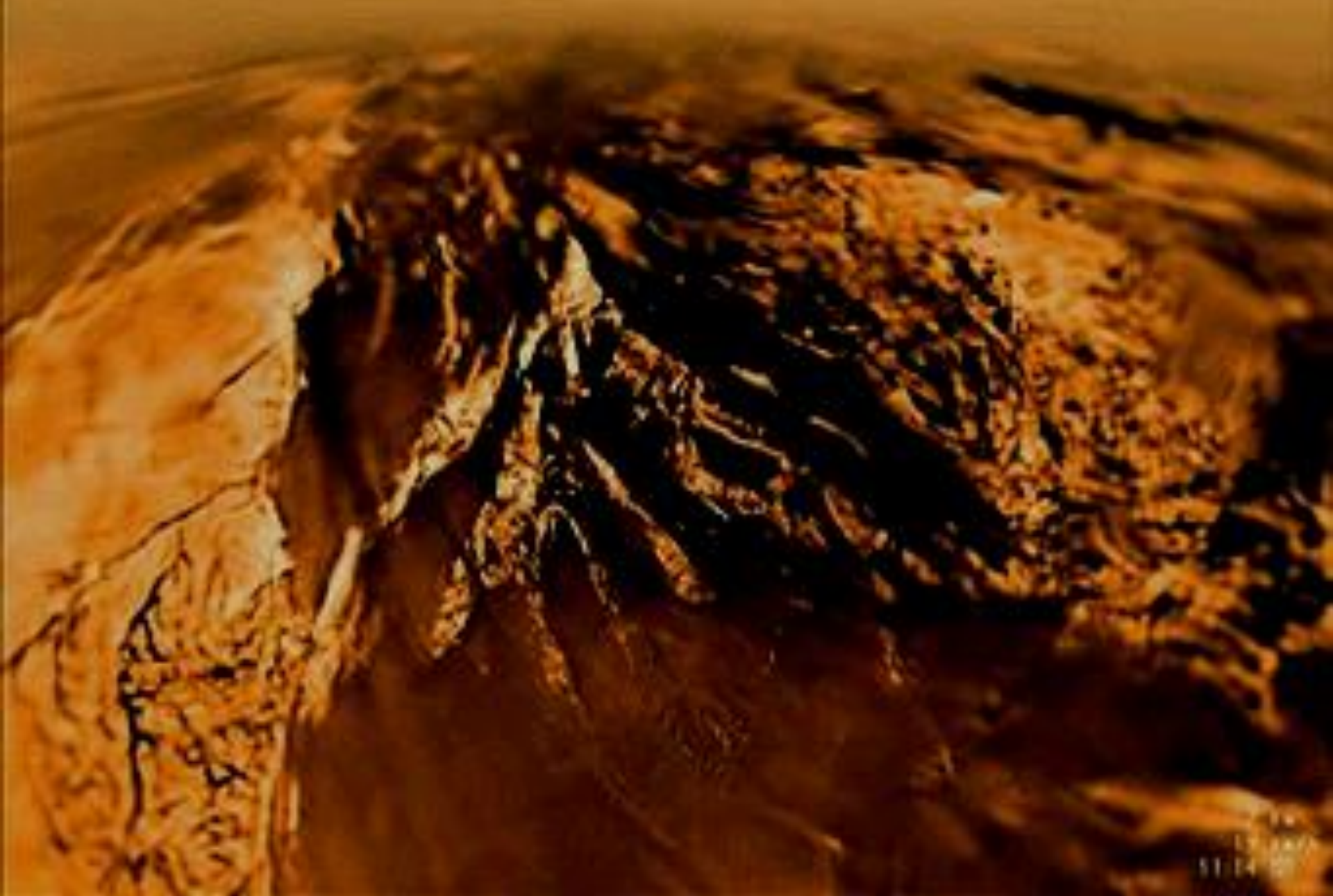
S VI
タイタン
Titan



2005年1月14日 **ホイヘンス**・プローブ、タイタンに着陸



着陸機ホイヘンスからの眺め（2005年1月14日）



着陸機ホイヘンスの様子（想像図）



タイタンの地表

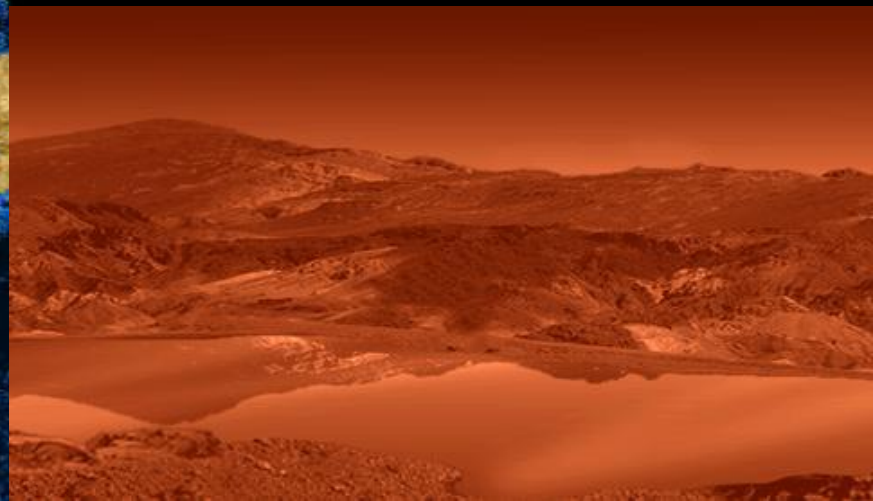


タイタンの北極域
で観察され、後に
南極域でも
見つかった。

スペリオル湖



(五大湖サイズの)
〔メタン〕エタン湖



タイタン表面(−179℃)で液体でいられるもの？

非極性分子

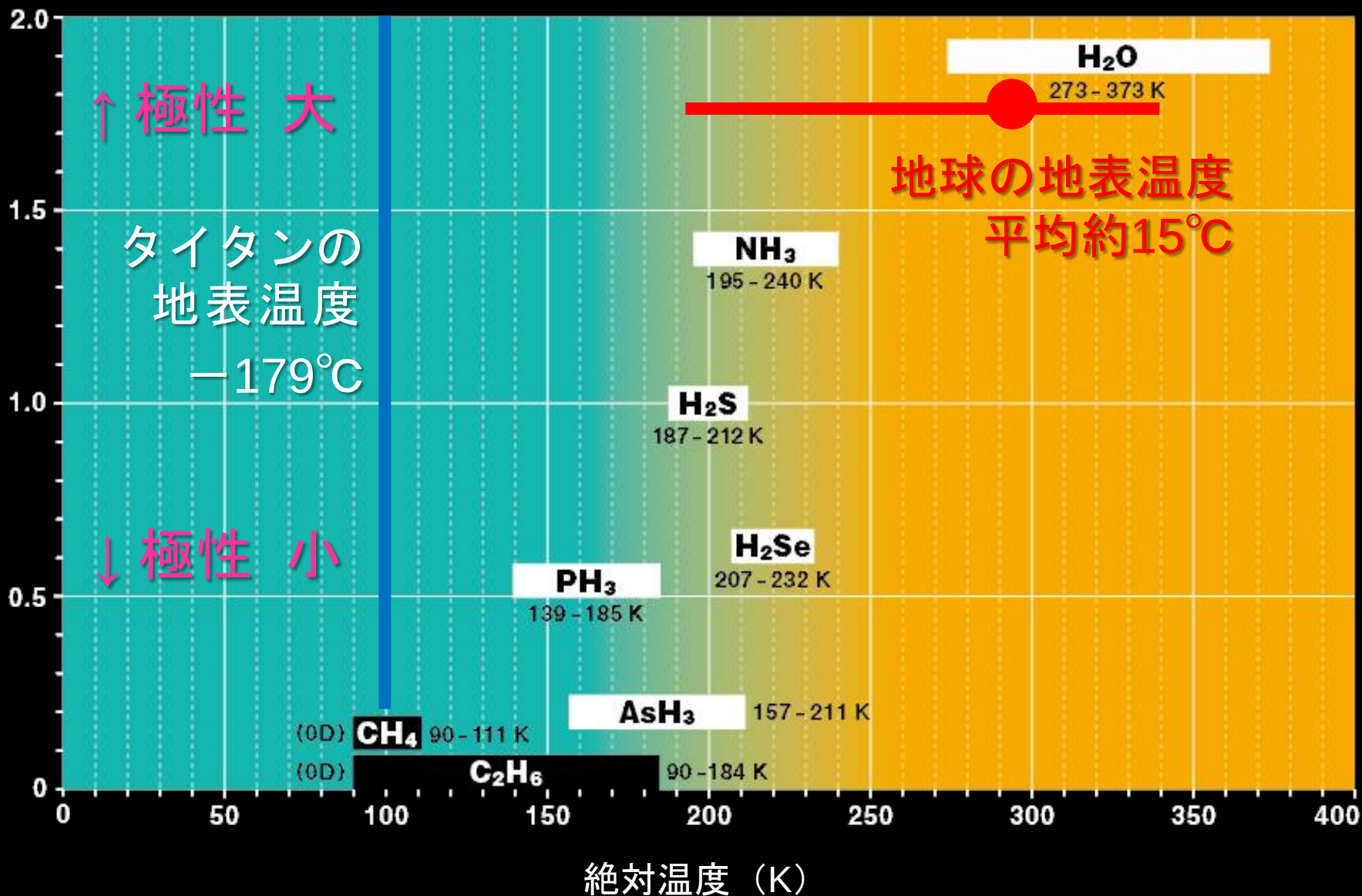
メタン	CH ₄	−162～ −183℃
エタン	C ₂ H ₆	−89～ −183℃
シラン	SiH ₄	−112～ −185℃
ゲル マン	GeH ₄	−90～ −165℃

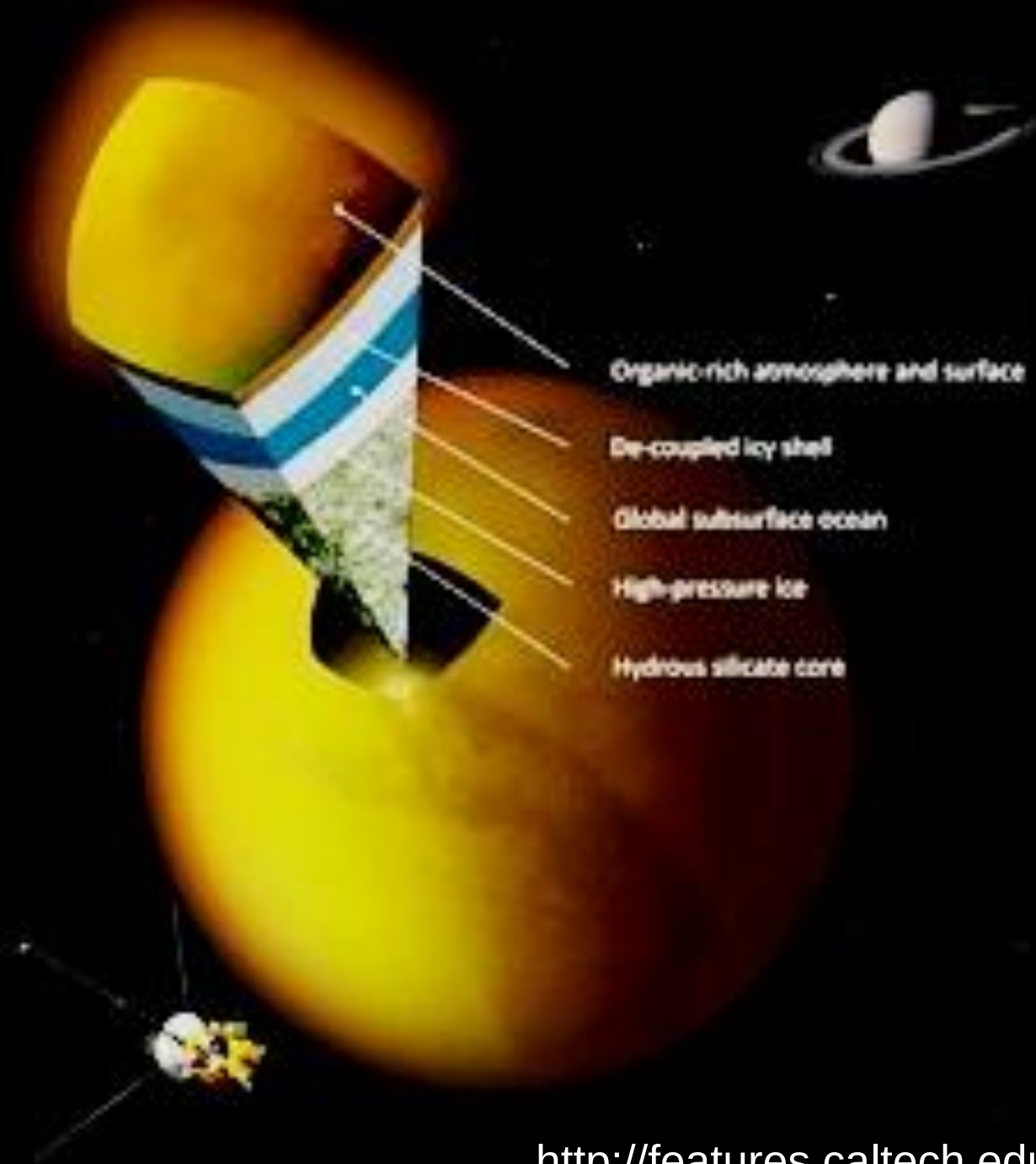
極性分子

アンモ ニア	NH ₃	−33～ −78℃	水	H ₂ O	+100～ 0℃
ホス ファン	PH ₃	−88～ −134℃	硫化 水素	H ₂ S	−61～ −86℃
アル サン	AsH ₃	−62～ −116℃	セラ ン	H ₂ Se	−41～ −66℃
窒素 分子	N ₂	−196～ −210℃	酸素 分子	O ₂	−183～ −219℃

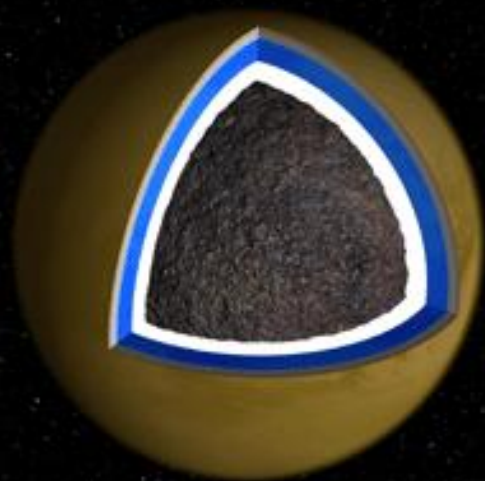
PH₃、GeH₄、AsH₃ などは木星や土星の大気に存在する

(関根康人さんの御教示)

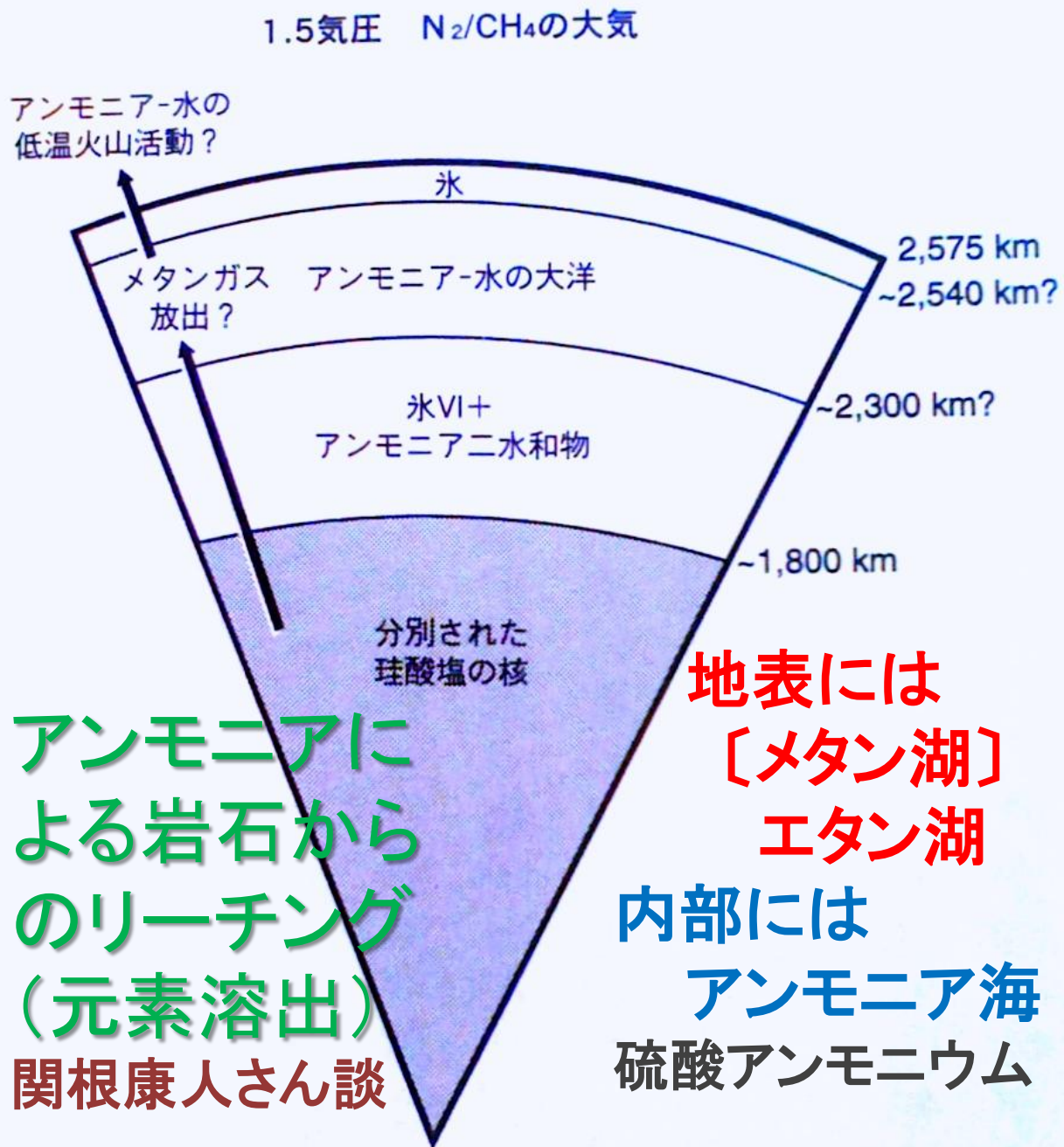




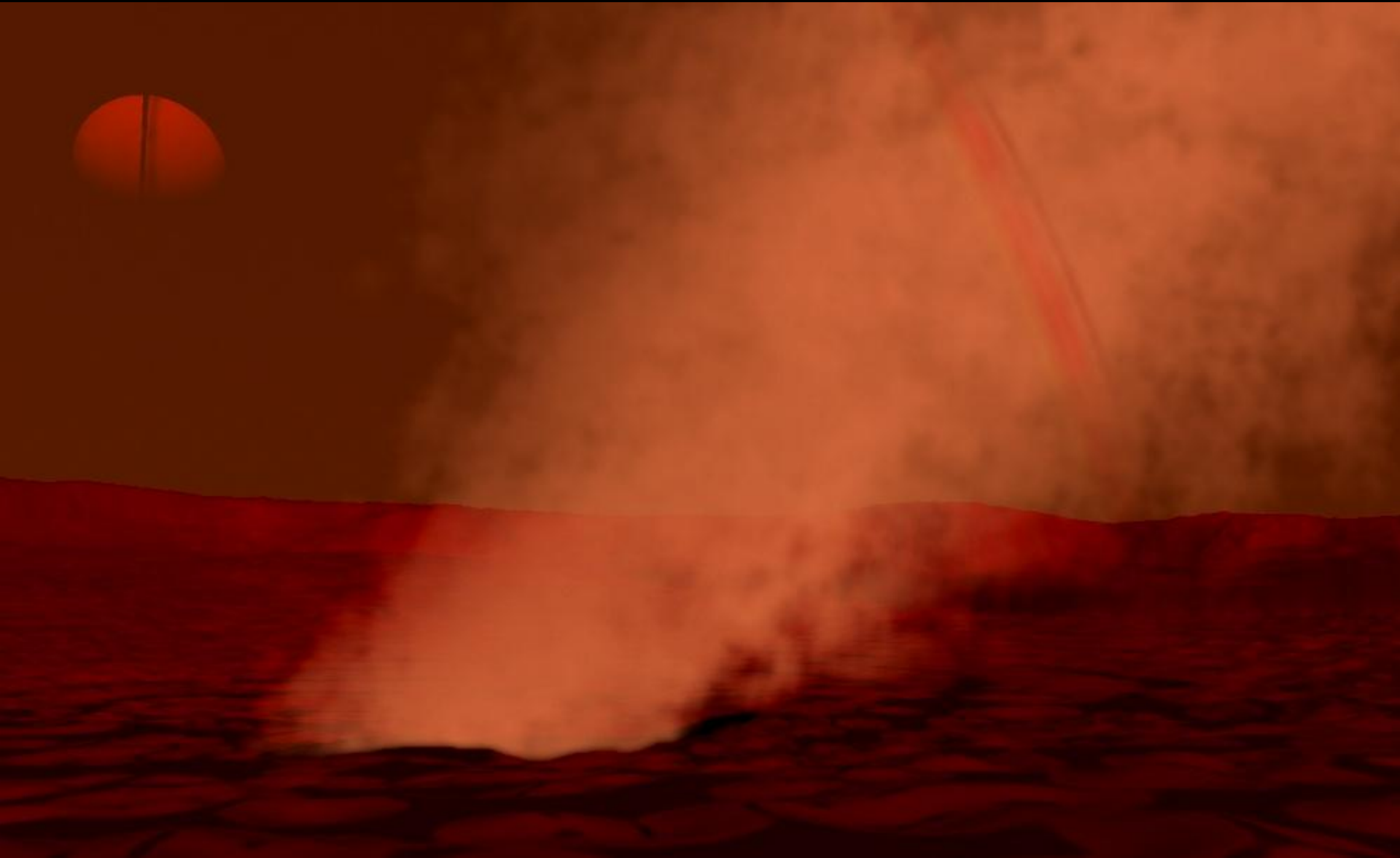
タイタンの 内部構造



よく分からない
熱源による H_2O
+ NH_3 の内部海



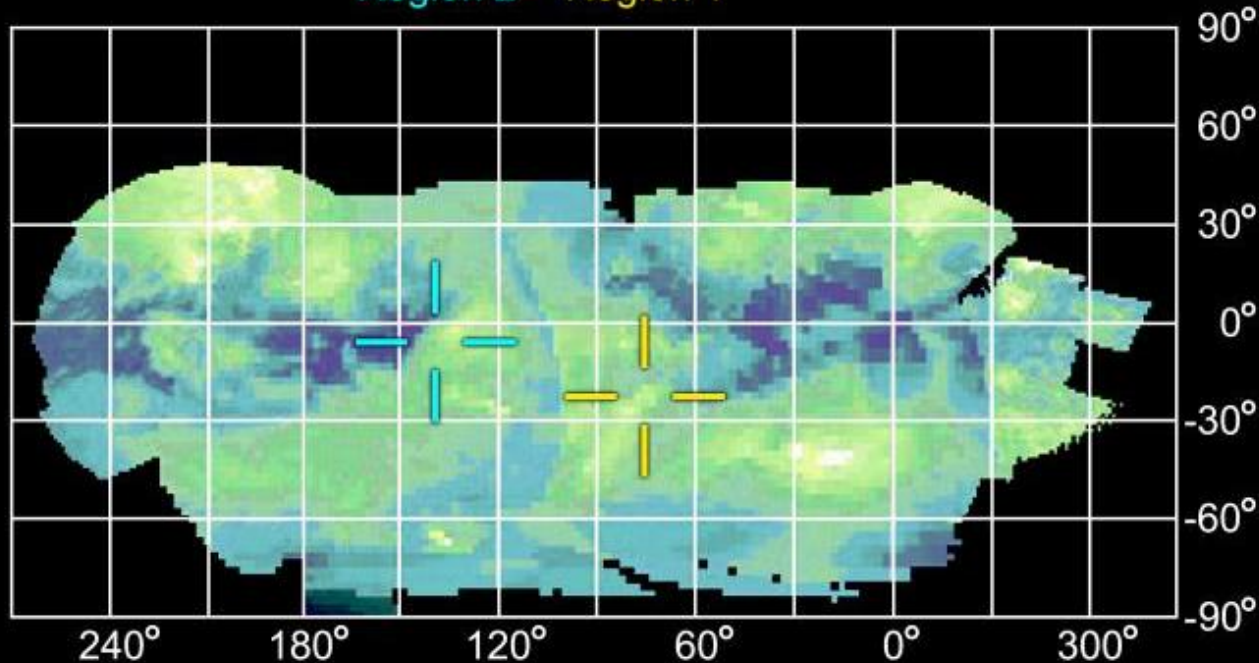
タイタンでは氷火山の活動も示唆されている



タイタンの氷火山（想像図）



Region 2 Region 1



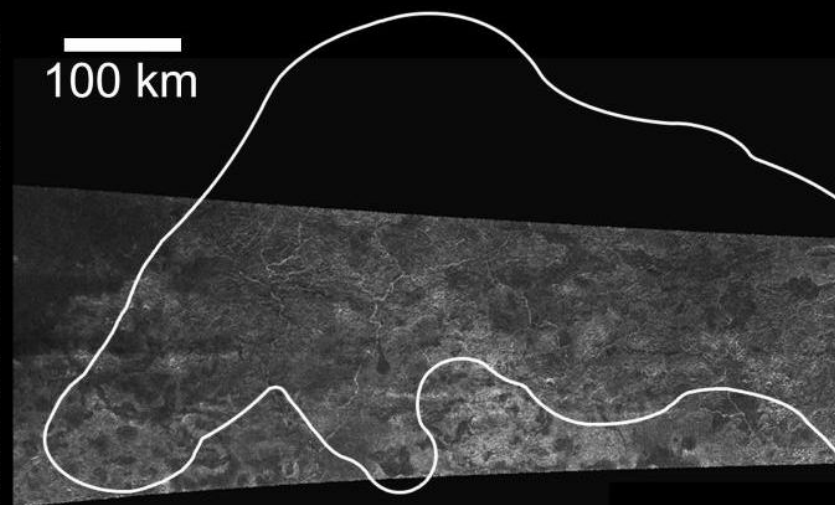
タイタンの 氷火山 (低温火山)

熱源不詳
過去の隕石
衝突の残熱？

大気中のメタンも、
氷火山活動も
永続きしない？



Region 1



Region 2



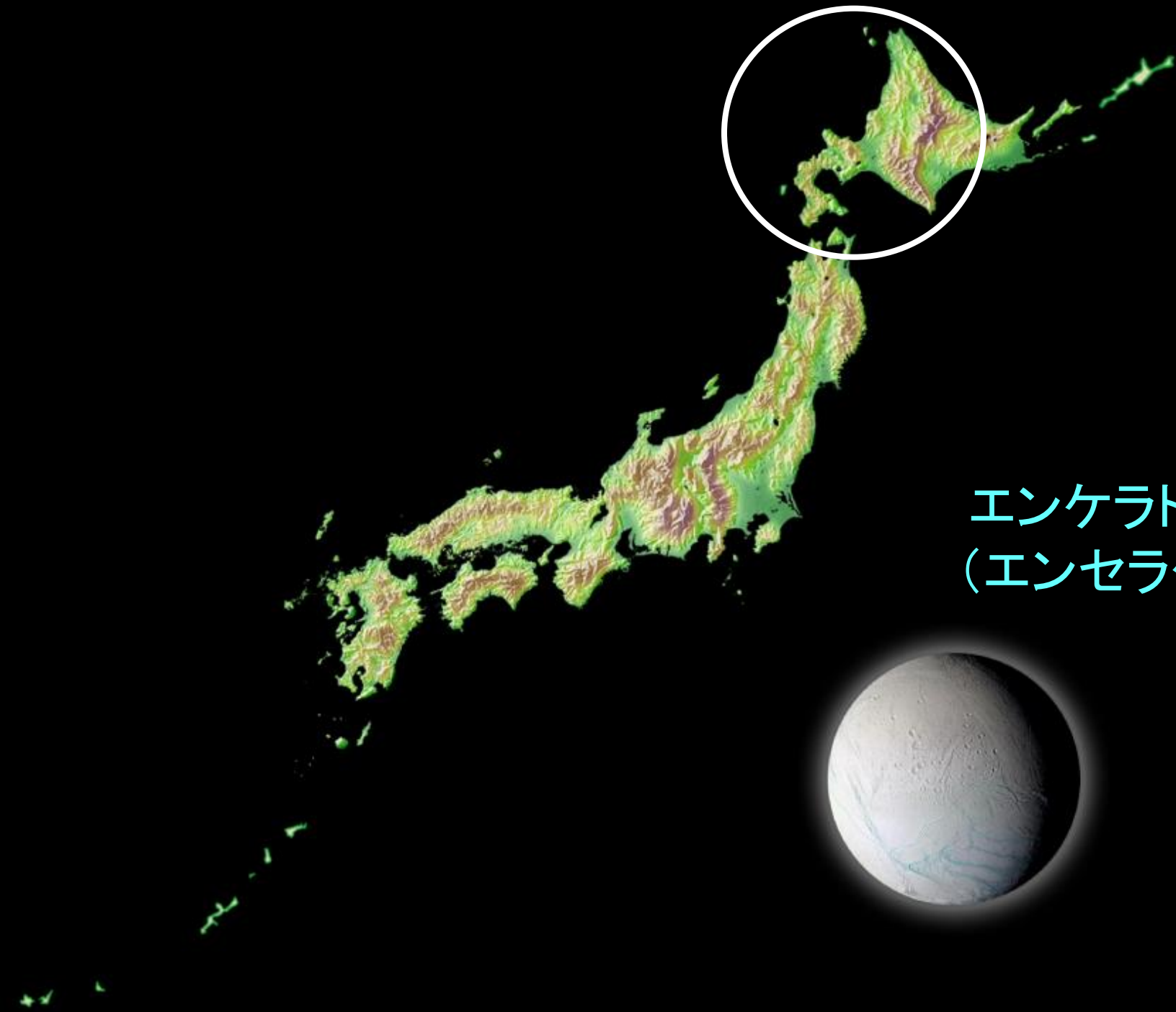
S II

エンケラドゥス

エンセラダス

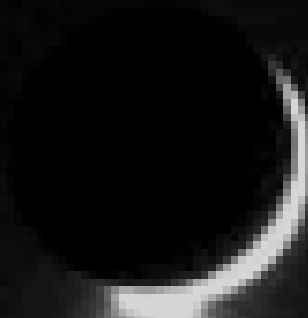
Enceladus





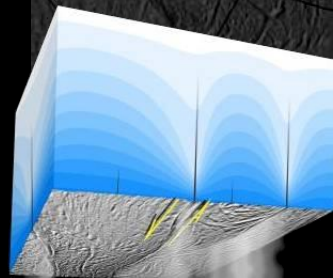
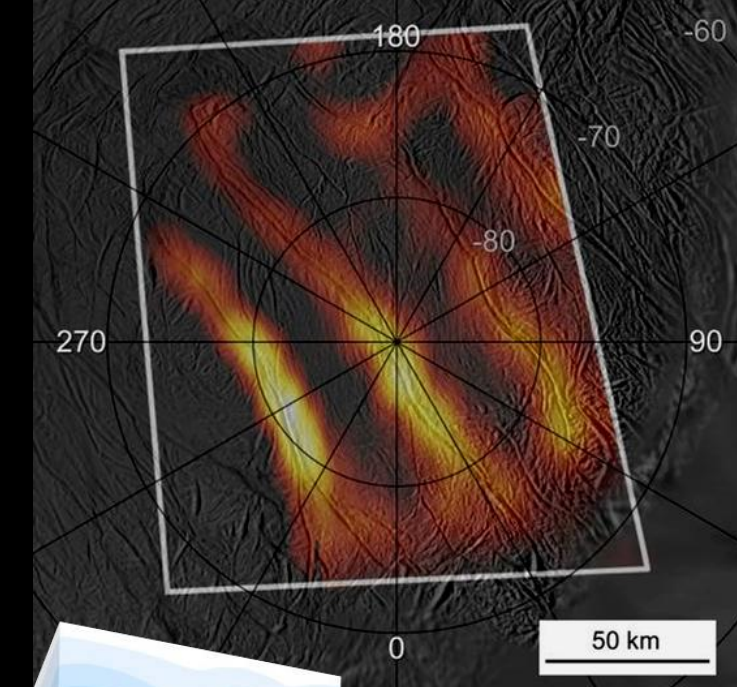
エンケラドゥス
(エンセラダス)





エンケラドゥスの南極域に

- 氷火山の噴出
- テクトニックな構造
- 高い熱流量



虎の縞
Tiger Stripe

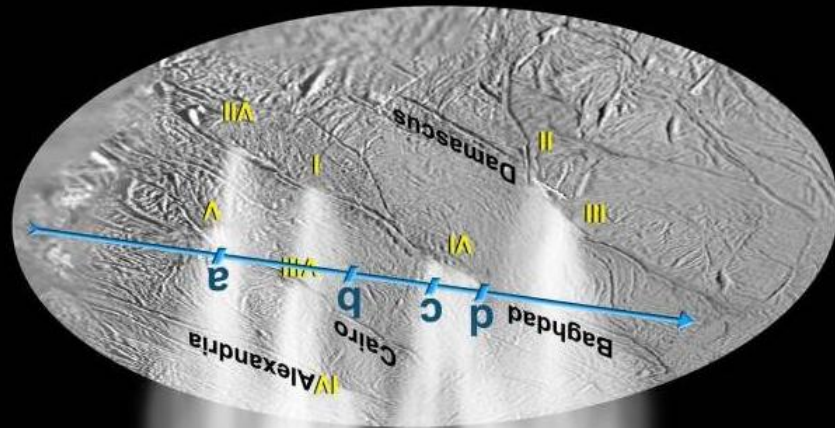
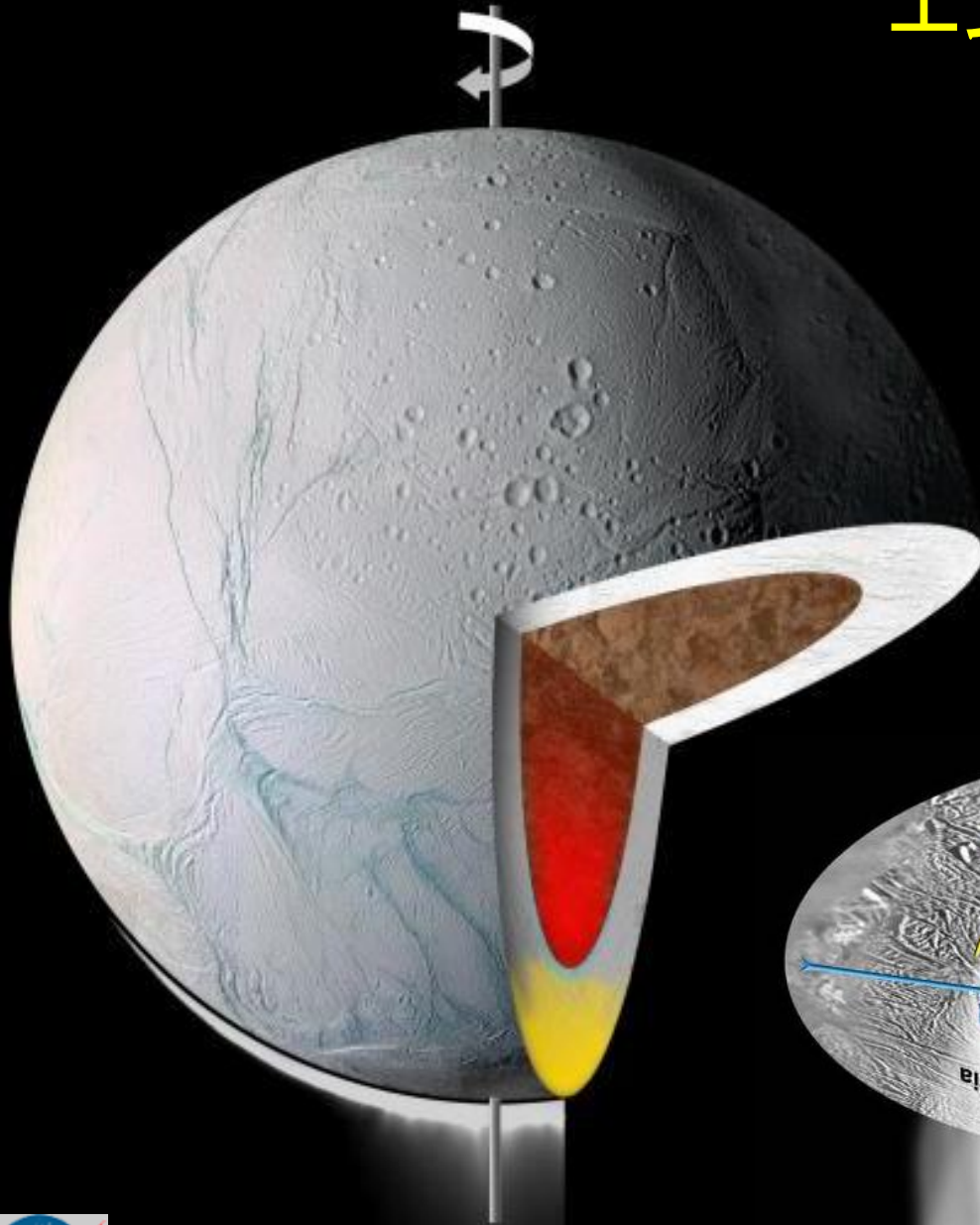
—93°C
(180K)

平均75K
より高温

エンセラダスの内部構造

よく分からない熱源による H_2O の内部海と
氷火山(低温火山)

^{40}Ar らしきシグナル
← 内部海に放出された
 ^{40}K 由来 ← 火成活動?

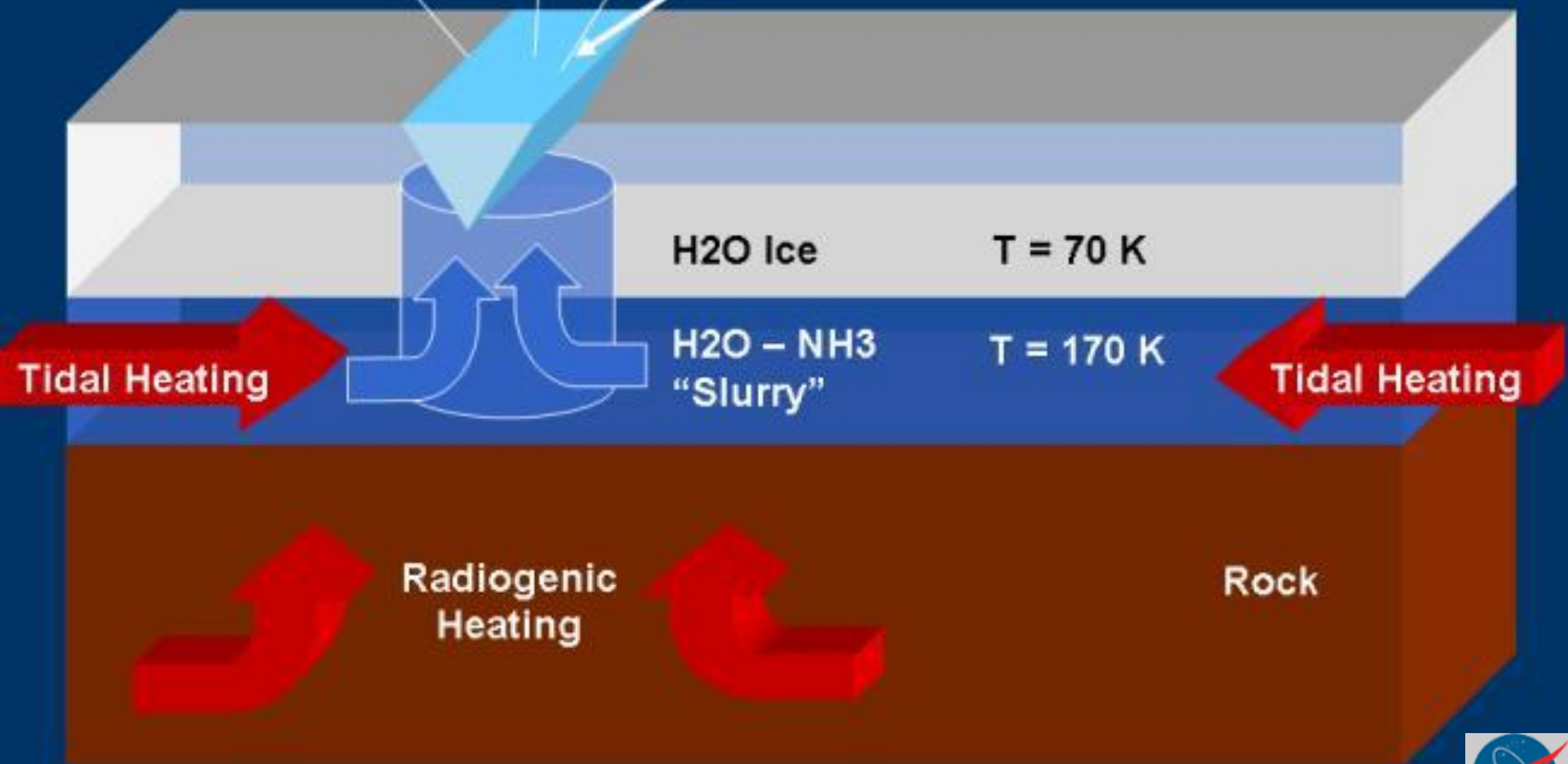


Subliming H₂O Molecules, $T \sim 140$ K

Sublimation Model

モデル1

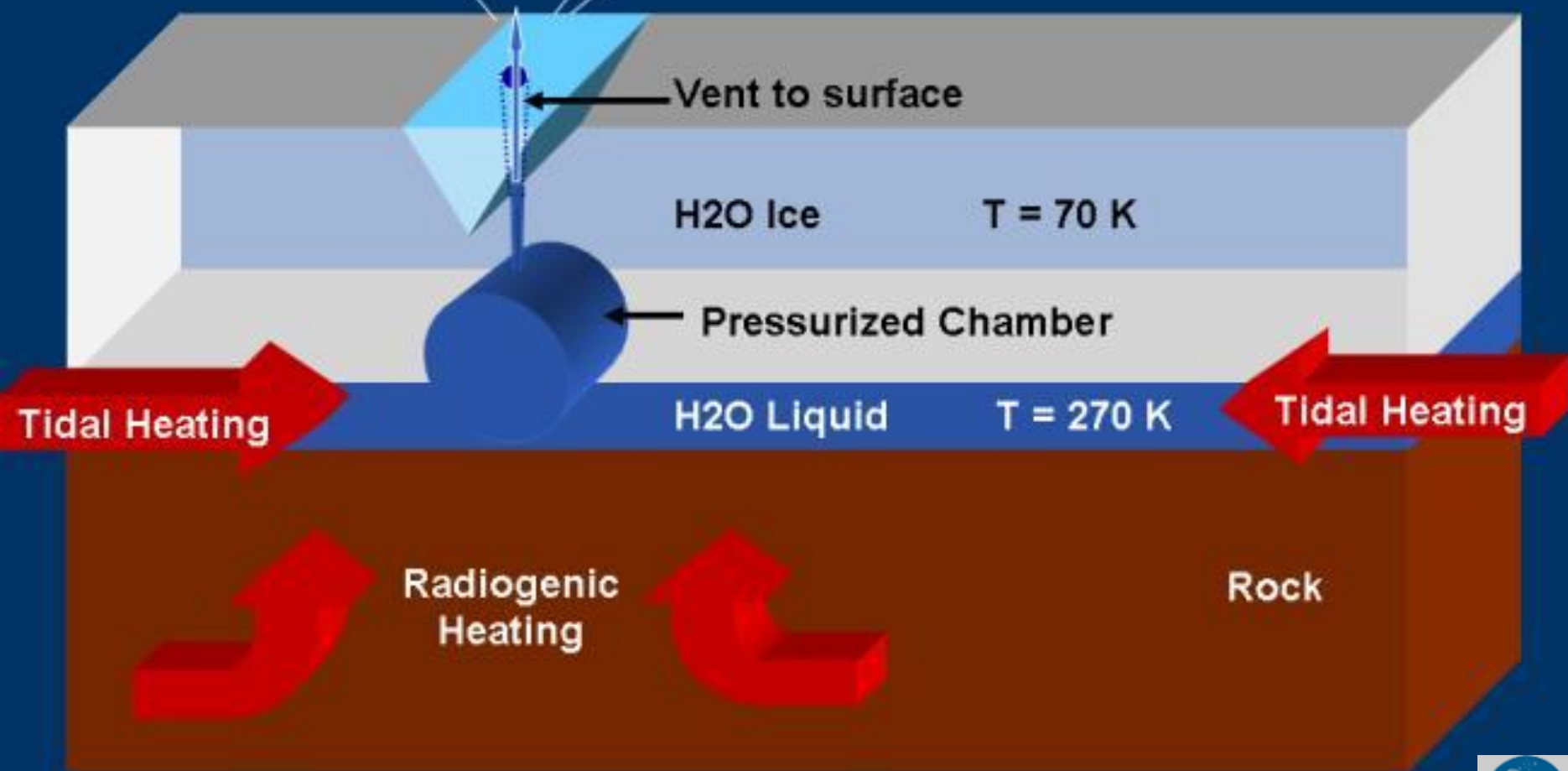
Warmed H₂O Ice, $T \sim 140$ K



モデル2

H₂O Vapor and Ice-particle Plume

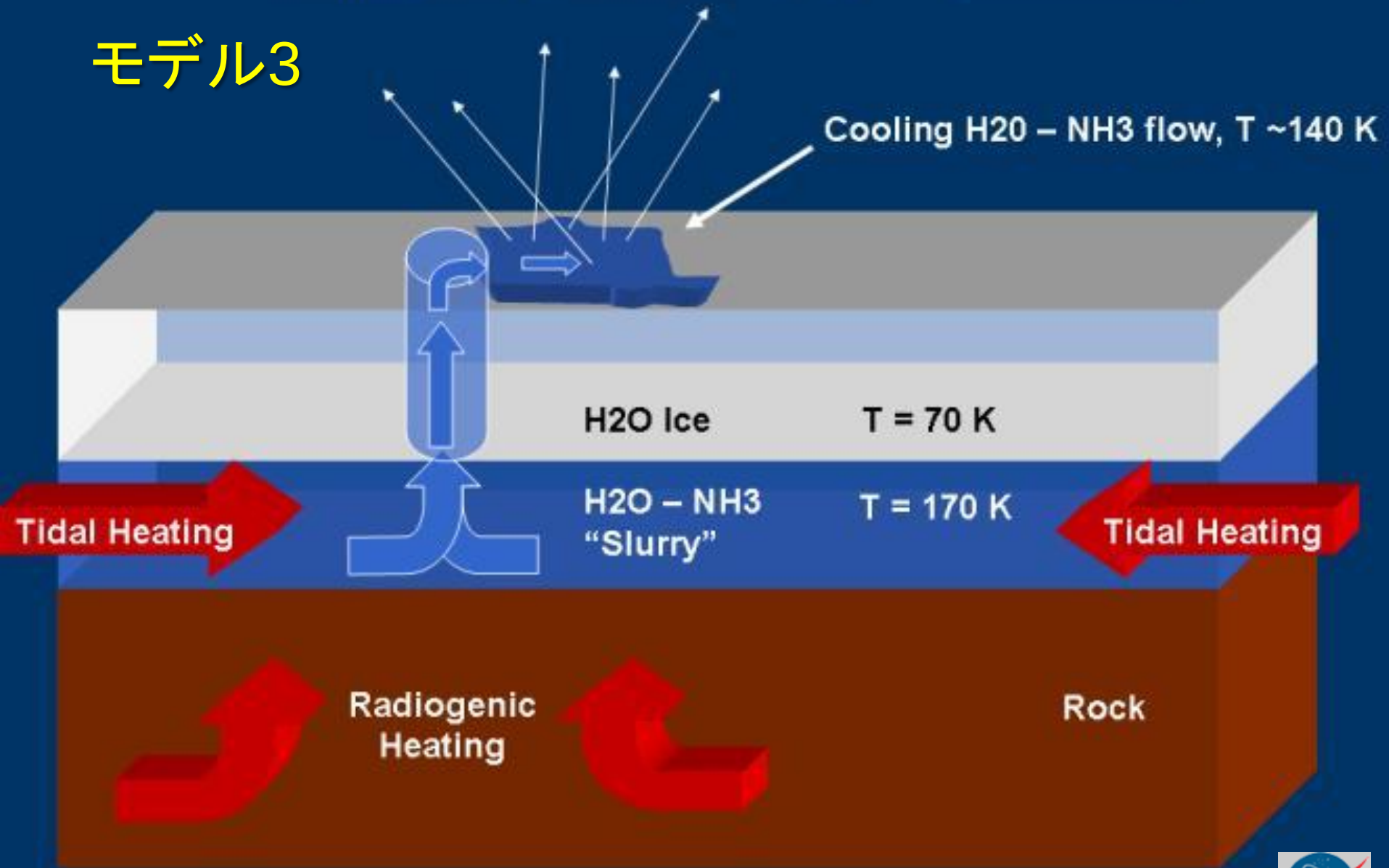
Venting, "Plume" Model



Subliming H₂O Molecules, $T \sim 140$ K

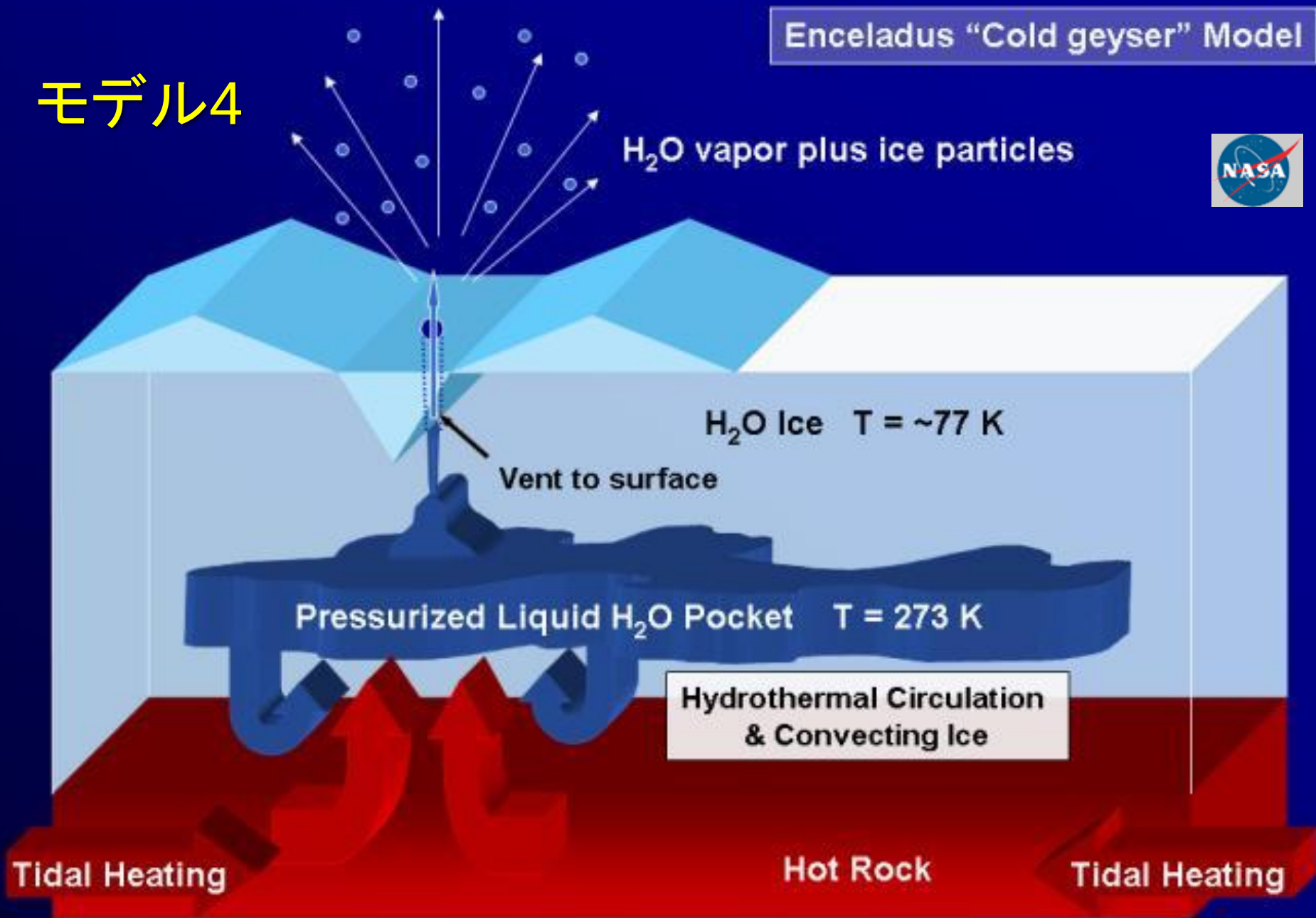
Flow Model

モデル3

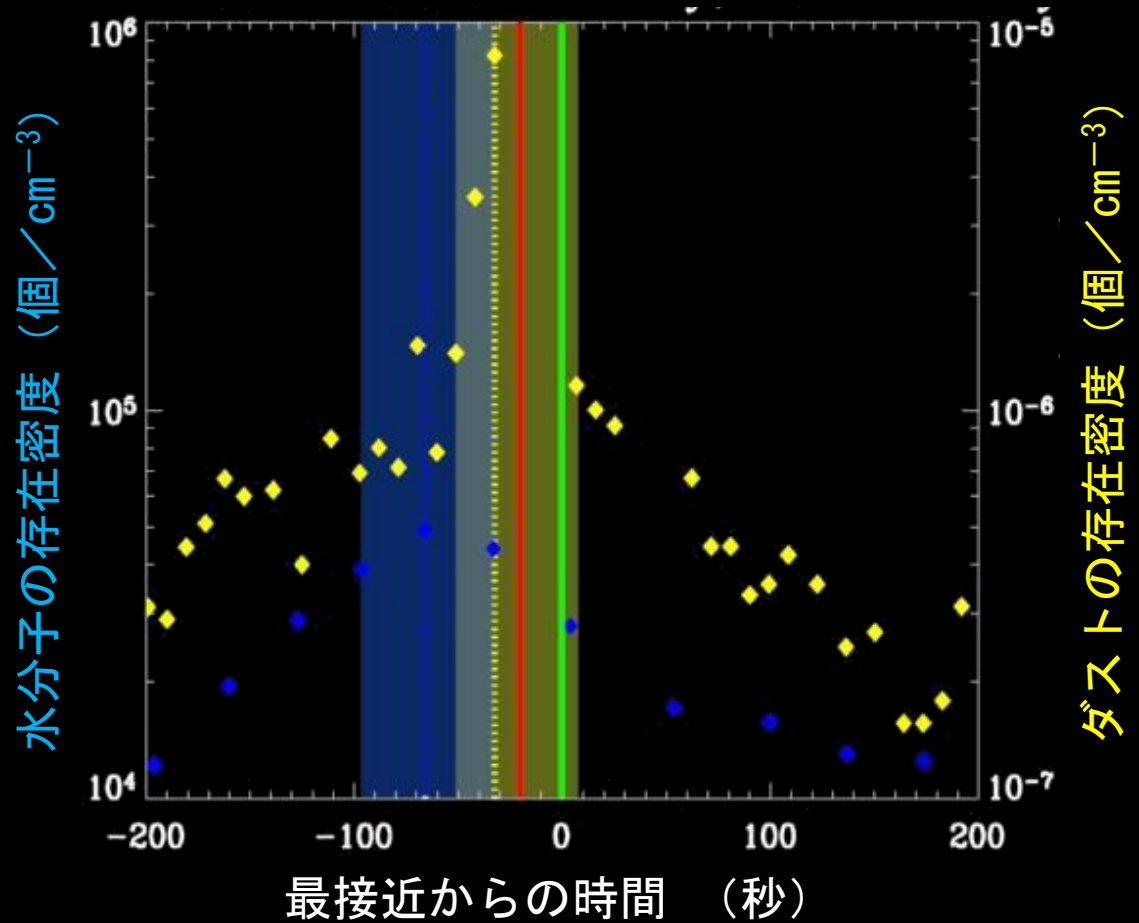


モデル4

Enceladus "Cold geyser" Model



水分子およびダストの存在密度



カッシーニ

エンケラドゥスの 氷火山の噴出物

水(18)

メタン
(16)

アルデヒド
アンモニア
シアン化合物
C1~C5(脂肪族)
C6(芳香族)

一酸化炭素
(28)

複雑な
有機物

二酸化炭素
(44)

Methane

Water Vapor

Simple Organics

Carbon Monoxide

Complex Organics

Carbon Dioxide

10

20

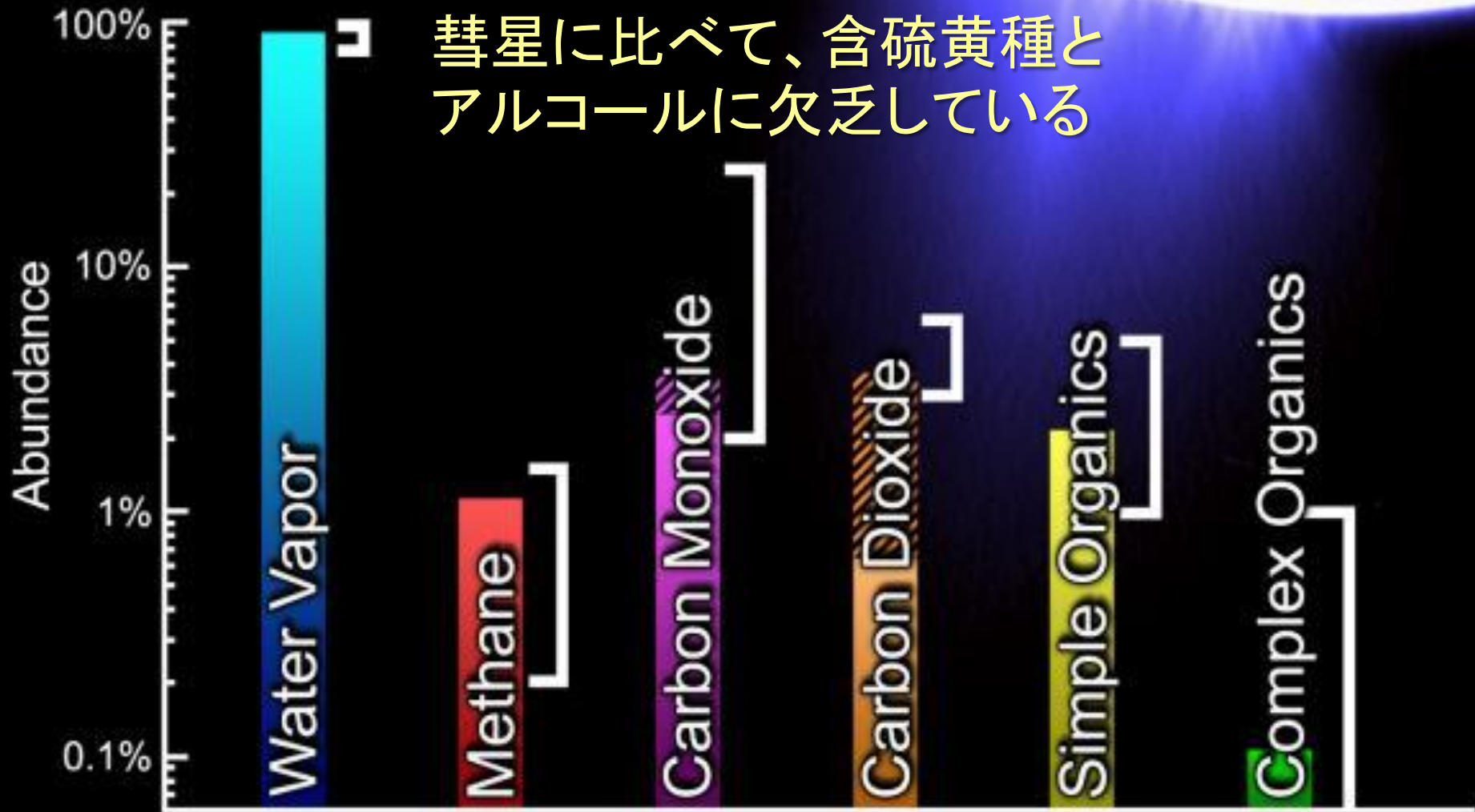
30

40

50

分子量(単位はダルトン)

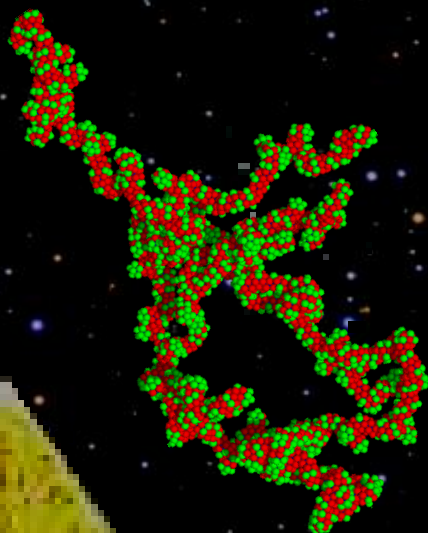
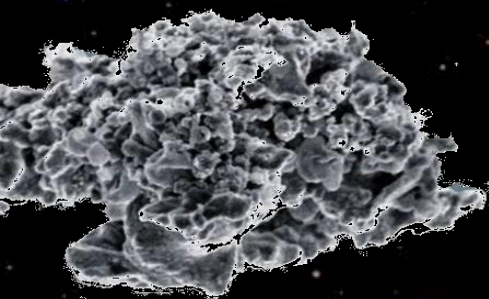
エンケラドゥス噴出物 と彗星物質の類似性



白いカギ括弧 **】** が彗星での存在量（%）を表している

	液 体			有機物	熱 源
	H ₂ O	NH ₃	メタン／ エタン		
彗 星	部分的？			いろいろ	太陽放射
エウロパ	内部海				潮汐加熱
タイタン	内部海？		地表湖	CH ₄ -C ₂ H ₆ ソリン他	氷火山*
エンケラ ドウス	内部海			いろいろ	氷火山*

* 氷火山の熱源は必ずしも明らかではない



1 宇宙 ($10^{26} \sim 10^{27}$ m)

10^0 グレートウォール (10^{24} m)

10^{11} 銀河系 ($10^{20} \sim 10^{21}$ m)

光年 (10^{16} m)

10^{22} 恒星 ($10^9 \sim 10^{10}$ m)

10^{23} 惑星 ($10^7 \sim 10^8$ m)

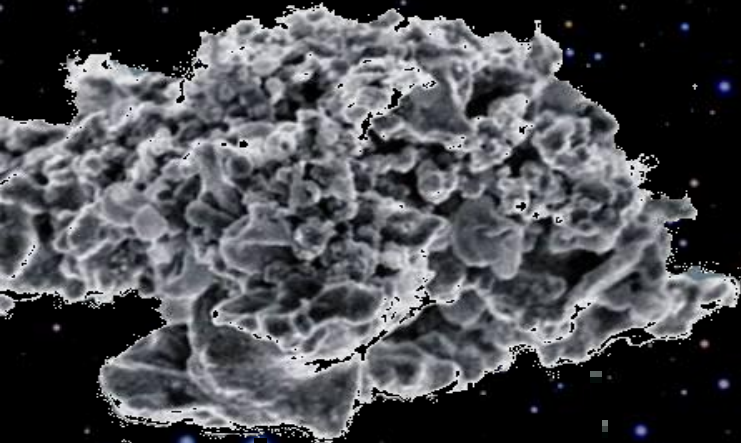
10^{30} 彗星 ($10^0 \sim$ m)

10^{55} 多孔質粒 ($10^{-6} \sim 10^{-5}$ m)

10^{57} 星間ダスト 宇宙塵 ($\sim 10^{-6}$ m)

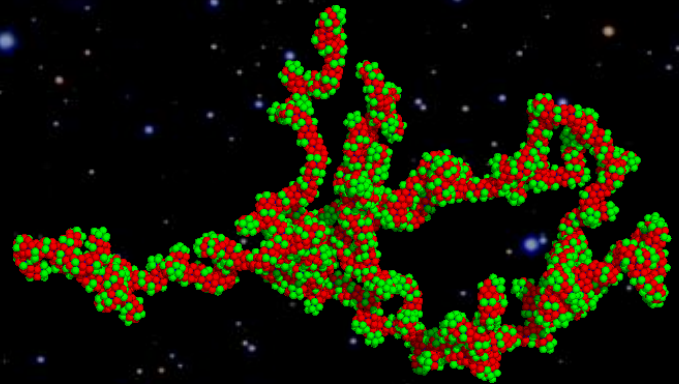
10^{80} 原子 (10^{-10} m)

1 彗星 ($10^0 \sim \text{m}$)



10^{25} 多孔質粒 ($10^{-6} \sim 10^{-5} \text{ m}$)

10^{27} 星間ダスト 宇宙塵 ($\sim 10^{-6} \text{ m}$)



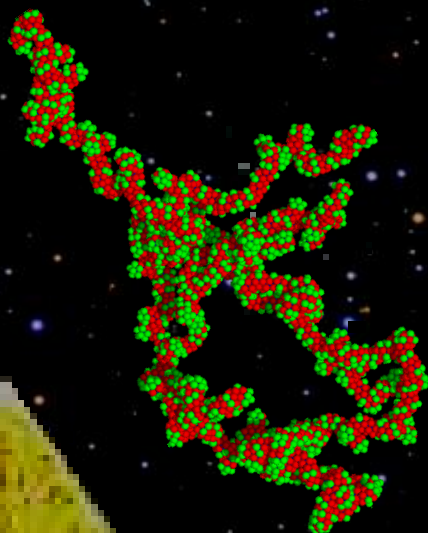
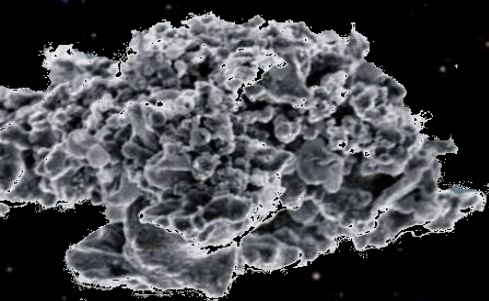
生命誕生は稀な出来事(イベント)か？

イベントの割り算(確率)で考える

生命誕生イベント ÷ 起こりえるイベント

どんなに低い確率でも絶対に当たる方法

→ 宝くじの全部買い



1 宇宙 ($10^{26} \sim 10^{27}$ m)

10^0 グレートウォール (10^{24} m)

10^{11} 銀河系 ($10^{20} \sim 10^{21}$ m)

光年 (10^{16} m)

10^{22} 恒星 ($10^9 \sim 10^{10}$ m)

10^{23} 惑星 ($10^7 \sim 10^8$ m)

10^{30} 彗星 ($10^0 \sim$ m)

10^{55} 多孔質粒 ($10^{-6} \sim 10^{-5}$ m)

10^{57} 星間ダスト 宇宙塵 ($\sim 10^{-6}$ m)

10^{80} 原子 (10^{-10} m)

